LA CIENCIA EN EL AULA

Biblioteca de CUESTIONES DE EDUCACIÓN
Dirigida por María Carmen Delgadillo
y Beatriz Alen

7. M. Rojo y P. Somoza - *Para escribirte mejor. Textos, pretextos, contextos*
8. M. C. Davini - *La formación docente en cuestión: política y pedagogía*
9. O. Devries - *Salud y educación. Sida en una escuela*
10. E. Litwin (comp.) - *Tecnología educativa*
11. M. A. Lus - *De la integración escolar a la escuela integradora*
12. Grupo SIMA. M. Marucco y G. Golzman (coords.) - *"Maestra, ¿usted... de qué trabaja?"*
13. A. de Camilloni y otras - *Corrientes didácticas contemporáneas*
14. S. Alderoqui (comp.) - *Museos y escuelas*
15. C. A. Cullen - *Crítica de las razones de educar*
16. G. Diker y F. Terigi - *La formación de maestros y profesores: hoja de ruta*
17. S. Nicastro - *La historia institucional en la escuela*
18. J. Akoschky y otras - *Artes y escuela*
21. L. Fernández - *El análisis de lo institucional en la escuela. Notas teóricas*
22. L. Fernández - *El análisis de lo institucional en la escuela. Obra completa* (4 volúmenes)
23. E. Dabas - *Redes sociales, familias y escuela*
25. S. Calvo y otros (comps.) - *Retratos de familia… en la escuela*
26. B. Fainholc - *La interactividad en la educación a distancia*
27. S. Duschatzky - *La escuela como frontera*
28. A. Padovani - *Contar cuentos*
29. M. Krichesky y otros - *Proyectos de orientación y tutoría*
30. A. Malajovich (comp.) - *Recorridos didácticos en la educación inicial*
31. M. I. Bringiotti - *La escuela ante los niños maltratados*
32. M. Libedinsky - *La innovación didáctica*
33. R. Morduchowicz - *A mí la tele me enseña muchas cosas*
34. M. Carozzi de Rojo - *Proyectos integrados en la EGB*
35. P. Pineau, I. Dussel y M. Caruso - *La escuela como máquina de educar*
36. J. Imberti (comp.) - *Violencia y escuela*
37. S. Alderoqui y P. Penchansky (comps.) - *Ciudad y ciudadanos*
38. R. Damin y A. Monteleone - *Temas ambientales en el aula*
39. S. Nicastro y M. Andreozzi - *El asesoramiento pedagógico en acción*
40. M. De Cristóforis (comp.) - *Historias de inicios y desafíos*
41. M. Panizza (comp.) - *Enseñar matemática en el Nivel Inicial y el primer ciclo de la EGB*
42. H. Hochstaet - *Aprendiendo de los chicos en el jardín de infantes*
43. L. Lacreu (comp.) - *El agua. Saberes escolares y perspectiva científica*
44. C. A. Cullen - *Perfiles ético-políticos de la educación*
45. P. Redondo - *Escuelas y pobreza: entre el desasosiego y la obstinación*
46. C. Soto y R. Violante (comps.) - *En el jardín maternal*
47. P. Pineau (comp.) - *Relatos de escuela*
48. G. Gellon, E. Rosenvasser Feher y otros - *La ciencia en el aula*

LA CIENCIA EN EL AULA

Lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla

Gabriel Gellon
Elsa Rosenvasser Feher
Melina Furman
Diego Golombek



Paidós
Buenos Aires • Barcelona • México

370.1 CDD Gellon, Gabriel
La ciencia en el aula : lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla/Gabriel Gellon ; Elsa Rosenvasser Feher; Melina Furman, Diego Golombek.- 1ª ed.- Buenos Aires : Paidós, 2005.
264 p. ; 22x16 cm.- (Cuestiones de educación)

ISBN 950-12-6148-4

1. Filosofía de la Educación I. Rosenvasser Feher, Elsa II. Diego Golombek III. Título

Cubierta de Gustavo Macri

1ª edición, 2005

Queda hecho el depósito que previene la Ley 11.723
Impreso en la Argentina - Printed in Argentina

Impreso en Primera Clase
California 1231, Ciudad de Buenos Aires, en julio de 2005
Tirada: 2500 ejemplares

ISBN 950-12-6148-4

ÍNDICE

Segunda Parte
El aspecto metodológico de la ciencia

Tercera Parte
El aspecto abstracto de la ciencia

Cuarta Parte
El aspecto social de la ciencia

Quinta Parte
El aspecto contraintuitivo de la ciencia

ACERCA DE LOS AUTORES

Los autores de este libro son científicos que han cursado sus licenciaturas en la Universidad de Buenos Aires. Desde su formación han seguido caminos diversos pero todos han desarrollado una importante labor docente en varios niveles educativos. En los últimos años han trabajado juntos en varios proyectos: museos de ciencia, campamentos científicos (como "Expedición Ciencia"), sitios web de ciencias (como "Experimentar") o libros de divulgación (particularmente a través de la colección "Ciencia que Ladra" de la editorial Siglo XXI).

Gabriel Gellon es doctor en Biología (Universidad de Yale). Ha sido docente de escuela secundaria en la Argentina y actualmente hace lo propio en los Estados Unidos. Fue el creador del sitio de Internet de ciencia para niños "Experimentar", de la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT), y ha realizado diversos talleres para niños y de capacitación docente. Es autor de un capítulo del libro de texto *Biología*, de Helena Curtis, y ha publicado *El huevo y la gallina. Instrucciones para construir un animal* (Buenos Aires, Siglo XXI, 2004).

Elsa Rosenvasser Feher es doctora en Física (Columbia University) y ha investigado la física del estado sólido (hoy conocido como materia condensada) en la Universidad de California en San Diego. Actualmente es profesora emérita y miembro de CRMSE (Center for Research in Math and

Science Education) en San Diego State University. Su carrera docente se ha centrado en el desarrollo de currículos basados en procesos de pensamiento para la enseñanza de ciencias físicas y naturales a docentes y público no experto. Fue creadora y directora del Centro Interactivo de Ciencias "Reuben H. Fleet" en San Diego. Ha realizado trabajos de investigación sobre procesos de aprendizaje de la ciencia. Su último libro es *Cielito lindo. Astronomía a simple vista* (Buenos Aires, Siglo XXI, 2004).

Melina Furman es licenciada en Biología (UBA) y master en Educación de las Ciencias (Columbia University). Ha sido creadora y coordinadora del sitio de ciencia para niños de la SECyT "Experimentar", durante los años 2000 a 2003. Codirige junto a Gabriel Gellon y Diego Golombek el programa de campamentos científicos "Expedición Ciencia" (www.expedicionciencia.com.ar). Ha enseñado ciencia en diversos establecimientos educativos en la Argentina y los Estados Unidos. Actualmente cursa un doctorado en Columbia University en enseñanza de las ciencias. Ha publicado *Ciencias naturales: Aprender a investigar en la escuela* (en colaboración con Ariel Zysman, Novedades Educativas, 2001) y *100cia para chicos (Experimentos en la cocina)* (Buenos Aires, Editorial ChicosNet, 2004).

Diego Golombek es doctor en Biología (UBA). Se desempeña como profesor en la Universidad Nacional de Quilmes e investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) en cronobiología, el estudio de los ritmos y relojes biológicos. Es autor de diversos libros de ciencia y divulgación científica y director de la colección "Ciencia que Ladra", así como coordinador del Área de Ciencias del Centro Cultural Ricardo Rojas (UBA) y colaborador en diversos medios gráficos y televisivos de periodismo científico. Su último libro es *ADN: 50 años no es nada* (compilado junto con Alberto Díaz, Buenos Aires, Siglo XXI, 2004).

INTRODUCCIÓN

Este libro está dirigido a docentes de ciencia, específicamente a profesores de física, química y biología de nivel medio, pero también a aquellos educadores, directivos y científicos interesados en la educación en ciencias. Las propuestas de esta obra provienen de la experiencia de los autores en su trabajo como científicos de diversas disciplinas (física, genética, neurobiología) y como educadores de variados niveles y estilos (secundario, universitario, en museos, al aire libre).

El propósito de este libro es discutir formas de mejorar la enseñanza de las ciencias en el nivel medio. Esto supone que la enseñanza actual, o al menos la tradicional, no cumple efectivamente con su objetivo educativo. ¿Cuál es este objetivo y qué evidencias tenemos de que la educación tradicional no logra alcanzarlo? ¿Cuáles son las propuestas recientes para resolver este problema? ¿Cómo se encuadran las propuestas del presente libro dentro de las visiones modernas de la educación en las ciencias? Éstas son las preguntas que intentaremos explorar en la presente introducción.

La tesis central de este trabajo es que las ideas que produce la ciencia están indisolublemente ligadas con la forma en que son producidas. Sostenemos que esta conexión es tan profunda que resulta imposible (o especialmente arduo) establecer una comprensión profunda de los conceptos científicos fundamentales sin un entendimiento más o menos cabal de cómo se arriba a esos conceptos a través de la investigación.

Las ideas producidas por la ciencia tienen sentido para los científicos porque éstos entienden cómo se ha manejado la evidencia, hasta qué punto las aseveraciones parten de observaciones o de modelos teóricos, qué tipo de críticas y restricciones se han hecho a determinada línea argumental, qué significa el apoyo de la comunidad científica o el valor de una publicación, e incluso en qué contexto histórico o político se ha generado una idea. Es decir, los científicos están embebidos en el proceso de la creación científica. Por el contrario, la educación tradicional en el aula ignora casi por completo el proceso de generación de las ideas, enfocando su atención casi exclusivamente en el producto final de la ciencia. Esto hace que los alumnos lleguen a comprensiones superficiales y frágiles, cuando no francamente erróneas, de las ideas científicas. Es posible y, a nuestro criterio, imperativo generar una educación en las ciencias cuyo foco sea el proceso de construcción de las ideas, a fin de que los estudiantes comprendan a fondo el significado del conocimiento científico.

Debemos aclarar que, en este libro, cuando decimos "ciencia" nos referimos a las ciencias naturales, que incluyen disciplinas como la física, química, biología, geología, meteorología y astronomía. No consideramos entre ellas a disciplinas que no estudian fenómenos de la naturaleza, como la matemática y las ciencias sociales. Por ende, cada vez que usemos las palabras "ciencia" o "ciencias" deberá entenderse que nos referimos a las ciencias naturales, a menos que se aclare lo contrario.

UNA EDUCACIÓN CENTRADA EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS IDEAS CIENTÍFICAS

Tradicionalmente, la educación ha consistido en la transmisión de un cuerpo de conocimientos, suponiendo que el profesor es el custodio del saber y los alumnos son *tabulas rasas* que, como un disco a grabar o un cesto vacío, deben llenarse de contenido. La educación en ciencias en el nivel medio ha girado tradicionalmente en torno a un programa de contenidos "canónicos" impartidos en clases teóricas magistrales, clases de laboratorio (en las que el alumno se familiariza con aparatos, drogas y procedimientos y comprueba las ideas formuladas en la clase teórica) y clases de resolución de problemas (para practicar los razonamientos y aplicaciones del tema). Aunque como concepción pedagógica este enfoque actualmente se considere anticuado, en la práctica se sigue usando. Posiblemente, por-

que no les resulte claro a muchos docentes cómo encarar la enseñanza de otra forma. De esto, en parte, trata este libro.

El enfoque actual de la enseñanza sostiene que los alumnos, lejos de ser recipientes vacíos, llegan al aula con ideas que son fruto de sus experiencias previas. Sobre la base de estas ideas y de sus interacciones con la realidad física y social del aula, los alumnos construyen nuevos conocimientos. Desde esta perspectiva, una de las tareas del docente debería ser ayudar al alumno a tomar conciencia de sus propias ideas preexistentes, dándole oportunidad para confrontarlas, debatirlas, afianzarlas o usarlas como andamiaje para llegar a ideas más sofisticadas. En suma, el alumno elabora o construye en forma activa su conocimiento y deja de ser un recipiente pasivo a la espera de material que le llega de afuera. Y el docente debe convertirse en facilitador y guía de este aprendizaje activo de sus alumnos.

Esta visión actual de la enseñanza cobra fuerza a partir de la década del setenta. En esos años aparecen, en forma independiente pero paralela, tres movimientos que buscan formas novedosas de entender cómo los alumnos construyen su propio entendimiento, y de poner en práctica los resultados. Revisemos brevemente estos movimientos. Por un lado, las sociedades científicas abrieron nuevas secciones en sus congresos, especialmente dedicadas a la presentación de trabajos de investigación sobre las dificultades de los alumnos para aprender conceptos científicos. Estas investigaciones diferían fundamentalmente de los trabajos educativos tradicionales que se centraban en análisis estadísticos del desempeño de los alumnos en pruebas y exámenes. Los nuevos trabajos, más bien, eran estudios cualitativos, que buscaban precisamente el detalle que se esfuma en los tratamientos estadísticos. Las metodologías se importaban de las ciencias sociales: algunos eran estudios de casos discretos; otros usaban entrevistas abiertas al estilo de Piaget; otros comparaban las estrategias de novicios y de expertos para resolver problemas. Los investigadores no eran ya educadores interesados en la enseñanza de la ciencia sino científicos interesados en cuestiones de aprendizaje.

En esta época también nace la "ciencia de la cognición", un campo interdisciplinario en la intersección de la biología, la inteligencia artificial, la psicología y la filosofía (Gardner, 1996). Esta ciencia busca entender cómo los seres humanos pensamos, resolvemos problemas, formamos conceptos. El surgimiento de la ciencia cognitiva representó una verdadera revolución ya que, previamente, los conductistas (también llamados behavioristas) sostenían que sólo era posible estudiar las respuestas a estímulos de un organismo que aprende y, desde esa perspectiva, la mente del estudiante o

“aprendedor” permanecía como una incógnita, una caja negra de la que nada podía inferirse (recordemos, por ejemplo, los estudios en los que se mide el aprendizaje mediante la toma de pruebas a los alumnos pre-enseñanza y postenseñanza de un módulo académico, en las que no se evalúa el proceso de pensamiento). Por el contrario, para los científicos de la cognición lo verdaderamente interesante es lo que sucede dentro de la cabeza del que aprende y la disciplina reúne una gran variedad de formas de encarar el problema.

Al mismo tiempo en que nace la ciencia cognitiva y surgen los trabajos de investigación sobre los procesos de aprendizaje de las ciencias, aparecen, también, los primeros museos de ciencia participativos. La base pedagógica de estos museos, claramente articulada en el Exploratorium de San Francisco, Estados Unidos, es que para aprehender un fenómeno de la naturaleza es necesario tener la oportunidad de experimentar y explorar cómo se manifiesta. O sea que un estudiante necesita involucrarse total y activamente con el fenómeno para llegar a comprenderlo a fondo. Estos museos novedosos (y altamente exitosos por la cantidad de público que los visita) permiten, a niños y adultos por igual, una exploración libre de los fenómenos naturales que es inusual (o inexistente) en las aulas.

El saldo de estos treinta años en los que estos tres enfoques han prosperado y nos han enriquecido es el legado de importantes conocimientos sobre cómo los alumnos aprenden ciencia. Y la certeza de que la enseñanza tradicional deja importantes huecos en el proceso de comprensión de los estudiantes.

Los estudios pormenorizados de la adquisición de conceptos científicos sugieren, en muchos casos, formas de abordaje, secuencias de ideas o tipos de actividades que promueven la comprensión de dichos conceptos. De manera general, para que los estudiantes construyan un edificio de conocimientos sólido, resultan necesarios la experimentación, las preguntas frecuentes, el diálogo socrático, los razonamientos rigurosos, lógicamente consistentes y carentes de circularidades. Todas estas son facetas del buen pensar en la clase de ciencias. Pero también son características distintivas del pensamiento de los científicos cuando hacen investigación. O sea, sostenemos que para lograr una verdadera comprensión del conocimiento científico es indispensable saber cómo se adquiere ese conocimiento. De ahí nuestra tesis central: la construcción del conocimiento científico en el aula debe reflejar de alguna manera la construcción del conocimiento científico por parte de los investigadores profesionales. La cuestión clave, entonces, es cómo promover en el aula la construcción por parte de los alumnos de los conceptos que deseamos enseñar.

LA CIENCIA Y EL AULA

Hemos hablado de “construcción de ideas científicas” utilizando dos acepciones diferentes. Por un lado, nos referimos a la construcción social del conocimiento científico, es decir, a la manera en que la humanidad, a través de la actividad científica, construye un cuerpo de conocimientos. Por otro lado, nos referimos a la tarea individual que cada alumno realiza para incorporar los nuevos conocimientos a su esquema de saberes previos. Estas dos actividades, si bien son descriptas igualmente como “construcción de ideas científicas”, comprenden procesos cognitivos y sociales muy distintos.

La diferencia más significativa entre ambas actividades es que la comunidad científica genera nuevo conocimiento en las fronteras de lo que se conoce, mientras que en el aula los alumnos construyen conceptos que, si bien son nuevos para ellos, han sido previamente validados por la ciencia.

¿Cómo podemos acercar el proceso de aprendizaje de ciencias en el aula al proceso de indagación científica de los científicos? Hay aspectos fundamentales de la actividad científica que pueden ser incorporados al aula y que, según nuestra experiencia, mejoran y enriquecen el aprendizaje y la enseñanza de las ciencias. De primerísima importancia en el aula, a nuestro criterio, son los aspectos *empírico, metodológico, abstracto, social y contraintuitivo* de la ciencia, que elaboramos a continuación.

Para empezar podemos reconocer que la investigación científica busca producir descripciones y explicaciones de la realidad o, dicho de otro modo, dar cuenta de lo que percibimos con nuestros sentidos. Ésta es una diferencia sustancial con otras disciplinas como la lógica (donde lo que importa es la consistencia interna), la ética o la literatura. En ciencias, el árbitro final de nuestras aseveraciones es lo que observamos (al margen de las limitaciones inherentes a cualquier observación). En el aula, la fuente última del saber es tradicionalmente el docente o el libro de texto. Pero un estudiante que nunca puede apreciar hasta qué punto las ideas científicas derivan del estudio de una realidad externa a nosotros, tendrá una idea distorsionada del valor de un enunciado científico. Si en nuestras clases de ciencia la respuesta siempre está en los libros y nunca en los resultados de los experimentos, estamos proveyendo una visión mutilada o falsa de la ciencia. Esta conexión indisoluble entre las ideas científicas y lo que experimentamos con nuestros sentidos es lo que llamamos el *aspecto empírico de la ciencia*. Ahondaremos en este aspecto en el capítulo 1, y en los capítulos 2 y 3 daremos ejemplos concretos de cómo incorporar ese aspecto de la ciencia a nuestras actividades en el aula.

¿Debemos concluir de lo antedicho que hay que desterrar las clases expositivas tradicionales e instituir únicamente clases de laboratorio? ¿Es el problema principal de la educación en ciencias la falta de experimentos en el aula? Podríamos pensar que si hacemos experimentos el aspecto empírico tiene que estar presente, pero esto no es así. Es totalmente posible realizar experimentos y experiencias de laboratorio de forma mecánica, repitiendo recetas; y, si bien en una clase práctica los estudiantes pueden familiarizarse con aparatos y procedimientos, esto no garantiza la comprensión conceptual. La genuina actividad mental consiste en hacerse preguntas, indagar, compartir las ideas propias, ser capaz de defenderlas y cuestionar las de otros. Si hablamos del rol activo del estudiante nos referimos a la actividad cognitiva y no al mero hacer. Una clase teórica puede hacer referencia clara y sin ambigüedades a la evidencia empírica que sostiene esta idea o aquel modelo. Esta actitud, sin experimento alguno, es ya un enorme paso adelante hacia la incorporación del aspecto empírico de la ciencia en el aula.

Además de su estrecha relación con la realidad a estudiar, la ciencia se caracteriza por el conjunto de herramientas del pensamiento y la indagación conocidas bajo el nombre general de "método científico". Se trata de un cúmulo de procedimientos, estrategias y técnicas que llamamos el *aspecto metodológico de la ciencia*. Como discutiremos en el capítulo 4, el método científico no es una receta infalible que puede aplicarse paso a paso en todos los experimentos. Pero si queremos que los alumnos entiendan cómo se hace ciencia y cómo llegamos a saber lo que sabemos, el método científico tiene que ser protagonista permanente de la clase de ciencias. En los capítulos 5 y 6 ilustramos la incorporación del método científico al aula.

A estos dos aspectos fundamentales de la ciencia –su conexión rigurosa con la realidad de los sentidos y su elaborado arsenal de métodos de indagación– debemos agregar otros, igualmente característicos y definitorios, que limitan y contextualizan a los primeros dos. Muchas de las ideas más importantes en ciencia no se derivan directamente de la observación de la realidad, sino que son el fruto de la imaginación humana. En general, estas ideas impuestas sobre la realidad desde la mente humana se denominan "modelos teóricos", teorías o construcciones teóricas. Las nociones de gen, átomo o energía han sido grandes actos de creación, ideas inventadas para explicar la realidad, pero no derivadas directamente de la simple observación. Las nociones teóricas tienen un rol central dentro del pensamiento científico, no sólo por su alcance explicativo, sino porque además moldean aquello que observamos o juzgamos relevante en una observación. Es por lo tanto crucial que los estu-

diantes de ciencia en un aula aprecien cómo surge y se valida una idea teórica, y cómo cambia con el tiempo por una combinación de evolución interna, fuerzas sociales y evidencia empírica. Estas ideas abstractas que se inventan para explicar la evidencia empírica constituyen lo que llamamos el *aspecto abstracto de la ciencia*. Si un estudiante no logra distinguir claramente entre una idea derivada de la observación directa y otra inventada para acomodar observaciones, no sólo no podrá entender de manera cabal la dinámica interna del proceso científico, sino que tendrá una visión frágil y caricaturizada de conceptos científicos importantes.

Así como las teorías moldean nuestras observaciones, también las fuerzas sociales dentro y fuera de la comunidad científica determinan lo que conocemos y cómo lo conocemos. Tanto la formulación de ideas por parte de los científicos como la construcción de conocimiento por parte de los estudiantes son procesos sociales en los que los participantes interactúan unos con otros para poner a prueba sus ideas y verificar si encajan con las de los demás. Actualmente se reconoce que el aspecto social del aula es un instrumento importante para una educación eficaz, un instrumento que está ausente de las clases en que el profesor expone los contenidos y los estudiantes toman nota y resuelven problemas sin interactuar entre sí. El *aspecto social de la ciencia* difiere de su contraparte en el aula, y es necesario resaltar esa diferencia para poder hacer al aula más científica. Mientras que en el aula puede existir un árbitro con autoridad, como puede ser el docente o el libro de texto, la actividad científica construye sus conocimientos mediante el consenso informado de una gran multitud de participantes, ninguno de los cuales es depositario *a priori* de la verdad. El proceso de crítica y mutua corrección por pares es característico de la ciencia y aparece en los sistemas de referato para la publicación de artículos en revistas profesionales y para la evaluación de proyectos de investigación. Las ideas o explicaciones a las que la ciencia arriba no resultan "ciertas" mediante criterios objetivos, infalibles y externos al grupo que debate sobre ellas; más bien se aceptan cuando la vasta mayoría de los participantes está convencida más allá de toda duda razonable.

A veces los estudiantes (o el público lego en general) miran con aprehensión este aspecto de la ciencia, como si negara todos los demás. Si todo depende de consensos y no hay criterios "objetivos", definitorios, ¿entonces la ciencia es un mero juego subjetivo en el que cualquier respuesta es válida? Para comprender que no es así, los estudiantes deben de alguna manera participar de la generación de conocimiento en grupo, a través de discusiones e intentos de persuasión en los cuales la evidencia empírica y

la lógica interna cumplen un papel central. Este tipo de experiencia lleva a los alumnos a entender que muchas veces los contextos culturales e históricos afectan a, y son afectados por, las ideas científicas en boga, y que tabúes culturales o personalidades intimidantes pueden determinar qué problemas se investigan y qué descubrimientos son viables.

Todo esto parece sugerir que la base de una eficaz y rica educación científica consiste en reproducir en el aula las condiciones de producción de conocimiento que encontramos en el laboratorio o equipo de investigación, es decir, permitir que los estudiantes se sumerjan en el libre juego de hacer ciencia como los científicos. Una posibilidad sería exponer a los estudiantes a un problema o serie de problemas reales, o a una colección de fenómenos desafiantes, y dejar que ellos mismos generen las ideas y descubran las leyes científicas. Este método de "jugar con las cosas y ver qué es lo que sucede"[1] puede ser estupendo en la escuela primaria. Pero no se puede pretender que niños o adolescentes descubran por sí mismos las ideas sutiles y poderosas de la ciencia.

Ocurre que muchas de las ideas importantes del conocimiento científico son profundamente contraintuitivas, y no se llega a ellas mediante las formas naturales de pensamiento del común de la gente. En otras palabras, podemos apostar que librados a su propio "descubrimiento" los estudiantes no siempre llegarán a las ideas y comprensiones buscadas por el docente. La ciencia es frecuentemente un desafío al sentido común. No sólo las ideas científicas suelen ser difíciles, sino que la forma misma de pensar que caracteriza a la investigación científica debe ser enseñada y aprendida. A este aspecto crítico del pensamiento científico lo denominamos el *aspecto contraintuitivo de la ciencia*. Lo trataremos en detalle en el capítulo 13, y en los capítulos 14 y 15 daremos ejemplos de las formas en que el pensamiento cotidiano, basado en el sentido común, dificulta el acceso a ciertas ideas científicas, y de cómo se puede allanar el camino a los alumnos.

En definitiva, la misma investigación que muestra lo inadecuado de la educación tradicional nos alerta sobre esquemas basados en la exploración sin guía por parte de los estudiantes. Es importante que los estudiantes formulen sus propias hipótesis y aprendan de otros más avezados cómo comprobarlas o refutarlas. Es importante que aprendan a realizar observaciones y extraer conclusiones de ellas, a hacer simplificaciones y generar modelos, a identificar los supuestos implícitos y tantos otros trucos del pensa-

1. Llamado *discovery learning* en la literatura en inglés.

miento científico. Una clase teórica clásica no puede brindar todas estas herramientas, pero tampoco pueden surgir del mero juego. El docente debe crear las condiciones que resulten una guía eficaz para la indagación y el desarrollo de las ideas científicas por parte de los alumnos.

ESTRUCTURA DEL LIBRO

Este libro consta de cinco partes, cada una de las cuales examina uno de los aspectos de la ciencia que hemos descripto en esta introducción. Cada parte comienza con un capítulo en el que se discute el aspecto en cuestión, mostrando cómo se expresa en el quehacer científico, cómo se puede llevar al aula y qué prácticas pedagógicas se pueden usar para incorporar este aspecto a la tarea educativa. Cada uno de estos capítulos expositivos va acompañado de dos capítulos ilustrativos en los cuales se dan ejemplos concretos de actividades educativas que incluyen las prácticas pedagógicas sugeridas.

Ofrecemos ejemplos que ilustran una variedad de formatos, desde prácticas de laboratorio y clases altamente centradas en el docente, hasta guías de indagación mediante las cuales los estudiantes pueden construir su propio conocimiento, incluyendo también teatralizaciones y discusiones abiertas. En cuanto al contenido, hemos incluido ejemplos de varias disciplinas, como química, biología, física y astronomía, entre otras.

Creemos que los ejemplos sugeridos exploran una cantidad suficiente de temas y formatos como para dejar al lector con la idea de que nuestro enfoque puede usarse en una gran variedad de circunstancias, y que no es sólo posible sino deseable que los docentes experimenten con sus propias actividades. Como en la investigación científica, la innovación en el aula depende enormemente de la creatividad individual y también, creemos, de la crítica mutua y la exploración conjunta. Al igual que en la investigación científica, para llegar a buen puerto en la enseñanza no existe un método único o una receta infalible. Pero cuanto más involucrados estemos en el proceso de desarrollo de las ideas, más maravilloso será el resultado.

Primera Parte

El aspecto empírico de la ciencia

1

EL MUNDO DE LOS FENÓMENOS

En este capítulo iniciaremos nuestra discusión acerca de los atributos que caracterizan a la actividad científica y que, de acuerdo con nuestra postura, deberían ser introducidos en el ámbito de la enseñanza. El primero de estos aspectos de la ciencia es quizá uno de los más prominentes pero, a la vez, también uno de los más fáciles de olvidar a la hora de enseñar. Se trata de la indisoluble conexión entre las ideas científicas y el mundo de los fenómenos que esas ideas buscan explicar.

La estrecha conexión entre el conocimiento científico y el mundo físico a nuestro alrededor es consecuencia del propósito fundamental de la actividad científica. Las ciencias naturales constituyen un intento de lograr descripciones precisas y explicaciones comprensivas del mundo que nos rodea y esto supone la existencia de una realidad que aprehendemos con nuestros sentidos. El conocimiento científico se corrobora mediante la repetición de observaciones de –y experimentos sobre– esta realidad, y por lo tanto lo que afirmamos *científicamente*[1] está conectado en última instancia con nuestra experiencia sensorial. Esto es lo que llamamos el *aspecto empírico* de la ciencia.

1. Afirmar científicamente implica que la afirmación cumple con varios requisitos que iremos dilucidando a lo largo de este libro. Hay otros tipos de afirmaciones, por ejemplo, las que se basan en una doctrina o fe religiosa, en un sistema legal o en un credo artístico. Éstas no son menos válidas que las científicas, pero son diferentes.

Como veremos a lo largo de este capítulo, existen varias características de la enseñanza tradicional que producen un cortocircuito con este aspecto de la ciencia. El uso del libro de texto como fuente última de autoridad, la ausencia de clases prácticas o de laboratorio, o la introducción prematura de terminología científica, es decir, antes de la comprensión de las ideas que le dan origen, son ejemplos de las numerosas prácticas en el aula que nos alejan de la ciencia como realmente es y nos conducen a clases que no reflejan la lógica o la filosofía de una mente verdaderamente "científica". En este capítulo queremos discutir con cierto detalle en qué consiste este aspecto empírico de la ciencia, cómo se manifiesta en el quehacer del investigador científico y cuándo y de qué maneras está ausente en las actividades del aula. Finalmente, analizaremos qué tipo de actividades o actitudes por parte del docente pueden reforzar este aspecto de la ciencia en el trabajo con los estudiantes.

EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA

Para un científico, las respuestas a sus preguntas deben estar avaladas por observaciones o experimentos. El conocimiento científico no es exclusivamente una construcción del pensamiento:[2] los productos del pensamiento puro, por más bellos que sean, no constituyen conocimiento científico si no dan cuenta de la realidad que buscamos explicar o describir. Por supuesto, parte de la actividad cotidiana de los investigadores radica en la construcción de modelos teóricos acerca de los más diversos tópicos, tema que abordaremos en el capítulo 7. Pero esos modelos sólo serán considerados válidos cuando sus predicciones se vean satisfechas con los experimentos correspondientes.

Una de las diferencias fundamentales entre la investigación científica y la enseñanza de las ciencias es que la primera busca producir ideas nuevas y, por lo tanto, el territorio que el científico explora es desconocido. Esto no es necesariamente así en la enseñanza de las ciencias: si bien el conocimiento a adquirir es desconocido por el alumno, el docente sabe por lo general muy bien adónde hay que ir, cuál es el rumbo del "descubrimiento" y su meta fi-

2. En el sentido en que lo es la matemática, disciplina en la que, dados los axiomas, lo demás son deducciones que no necesitan una ratificación empírica.

nal. Es más, el alumno sabe que el docente conoce ese camino y espera, por lo tanto, que le sea revelado o, por lo menos, ser guiado hacia él.

Como el camino está trazado, es fácil olvidar en el aula los orígenes empíricos de las ideas científicas y quedarse con el resultado final, sin tener en cuenta cómo esas ideas se conectan con evidencias en el mundo de los fenómenos (o, incidentalmente, olvidando también sus bases históricas y las posibles controversias que hubieran aparecido en el trayecto). Esto se da en extremo si se utiliza una forma declarativa de enseñanza de las ciencias, en la que el docente (o el libro de texto) les cuenta a los alumnos cómo "es" la realidad. En este caso, la fuente fundamental del saber no es la observación o el experimento, sino la palabra consagrada en el libro de texto o en la autoridad del docente.

Si queremos, por lo tanto, llevar adelante clases de ciencias con espíritu científico, deberemos volcar gran parte de nuestros esfuerzos en basar el aprendizaje en los fenómenos y evitar la palabra "revelada" como fuente de conocimiento. Por otro lado, sabemos que es imposible que los estudiantes redescubran por sí mismos aquello que las mentes más brillantes de la humanidad tardaron siglos en develar. Estamos por lo tanto frente a un complejo problema: cómo preservar un aspecto fundamental de la actividad científica en el contexto del aula.

CONTACTO DIRECTO CON LOS FENÓMENOS

Reconocer el carácter empírico de la ciencia en el aula implica, ante todo, poner a los estudiantes en contacto con el mundo de los fenómenos. Thomas Huxley, uno de los primeros científicos en sostener la importancia de introducir la ciencia en las escuelas, sostenía ya en 1899 que "la gran peculiaridad del entrenamiento científico […] es poner a la mente en contacto directo con los hechos, y […] extraer conclusiones de hechos particulares conocidos a través de la inmediata observación de la naturaleza" (citado en De Boer, 1991).

Es importante reconocer dentro del currículo cuáles son aquellos fenómenos que no les son familiares a los estudiantes e incluirlos de alguna manera en los contenidos a enseñar en clase. ¿Qué sentido tiene explicarles a los alumnos por qué suceden cosas que ellos ni siquiera saben que suceden? Según nuestra experiencia, por ejemplo, los estudiantes secundarios tienen poca exposición a fenómenos de cambio de estado. Saben que el agua se congela y evapora, pero rara vez han sido conducidos a observar que

otras sustancias también son capaces de estos cambios. Los chicos de hoy rara vez han visto con sus propios ojos cómo se funde un metal. Cuando un trozo de parafina se derrite, con frecuencia llaman a la cera derretida "agua". Así, cuando hablamos de cambios de estado y su interpretación molecular, nos estaremos refiriendo a una teoría alejada de las vivencias de los alumnos. Y por eso consideramos fundamental que, en la medida de lo posible, los alumnos adquieran experiencia "de primera mano" sobre los fenómenos que queremos explicar.

Al observar fenómenos es importante dar a los estudiantes la oportunidad de formar sus propias ideas sobre lo que ocurre y de dar sus propias explicaciones antes de introducir la explicación científica. Es deseable también inducirlos a formular predicciones, especialmente aquellas que se puedan verificar experimentalmente. He aquí un ejemplo. En el patio de la escuela cada alumno tiene una tarjeta en la que ha hecho un pequeño agujero redondo y, de espalda al sol, mira la sombra de la tarjeta en el suelo y la luz en forma de círculo en el medio. Preguntamos: "¿Qué vamos a ver en medio de la sombra de la tarjeta si hacemos un agujero cuadrado pequeño?". Predicciones: "Un cuadrado", dicen los que opinan que la forma de la imagen es la del agujero; "Un círculo", dicen los que opinan que la imagen es redonda como el objeto luminoso (el sol).[3] Ahora, y sólo cuando los alumnos están comprometidos con su predicción explicada, se hace la prueba.

Ésta es, en parte, la estrategia de los museos de ciencias participativos, que surgieron para contrarrestar la tendencia centrada en los libros, teórica y abstracta, que invadía las escuelas. Los módulos más exitosos en estos centros participativos son aquellos que ponen al visitante en contacto directo con fenómenos básicos de la naturaleza y dan suficiente flexibilidad a las manipulaciones como para que el visitante se haga preguntas del tipo "¿Qué pasaría si muevo esto acá o si pongo esto otro allá?", y pueda contestarlas allí mismo, interactuando con el módulo. Estos mismos criterios pueden ser usados exitosamente para el diseño de actividades dentro del aula.

Otra estrategia interesante es exponer a los alumnos a fenómenos llamativos para los que no hay una explicación evidente. Por ejemplo, mostrarles una mesa que "levita" sobre cuatro globos inflados, uno bajo cada pata, sosteniendo el peso de dos alumnos sentados sobre ella. Estos fenómenos

3. En el capítulo 14 discutiremos fenómenos parecidos a éste con más detalle.

discrepantes (Harcombe, 2001), llamados así porque no concuerdan con lo que los alumnos esperan ver, generan no sólo curiosidad sino una necesidad genuina de comprender por qué sucede lo que tienen ante sus ojos. Cuando las observaciones resultan difíciles de conciliar con experiencias previas, se convierten en problemas para resolver y desafían a buscar nuevas explicaciones.

USO Y ABUSO DE LAS PALABRAS

Presentar en clase abundantes experiencias que pongan a los estudiantes en contacto con la realidad a explicar es un buen comienzo para llevar el aspecto empírico de la ciencia al aula. Pero hay que prestar atención al uso de prácticas verbales que puedan interferir, insidiosamente, con este buen comienzo. La instrucción en ciencias está plagada de terminología técnica, y la manera en que introduzcamos esta terminología tendrá un profundo impacto en la idea que los estudiantes se hagan de la ciencia y sus modos de trabajo.

Tomemos el ejemplo del fenómeno discrepante del párrafo anterior (la mesa que "levita" sobre globos inflados). A lo largo de esta investigación, podremos introducir términos técnicos como "presión" y "fuerza" a medida que los alumnos necesiten nombrar los fenómenos que están observando y describiendo. Por el contrario, si ha sido definida desde un comienzo, estaremos poniendo el énfasis en la terminología, no en las ideas asociadas, y, de ese modo, estaremos consagrando a la palabra y no a los fenómenos como fuente de saber. Por ejemplo, un profesor que empiece la clase diciendo: "Hoy abordaremos el tema 'fuerzas'. Chicos, ¿qué entienden ustedes por 'fuerza'?", parece indicar que el conocimiento reside en entender el significado de la palabra "fuerza", la cual puede fácilmente buscarse en el diccionario. El objeto de la física no es develar el significado de la palabra "fuerza" sino entender cómo interactúan los objetos materiales unos con otros y cómo esas interacciones afectan el movimiento de los objetos. Una clase de ciencias no debe buscar darles significado a los términos. Por el contrario, los términos deben acuñarse justamente para poder referirse a fenómenos presenciados e ideas formuladas que se conocen pero no han sido nombrados todavía.

Con frecuencia los estudiantes creen que nombrar un fenómeno es entenderlo, que comprender radica en nombrar algo o referirse a terminología sofisticada. "¿Por qué caen las cosas?", pregunta por ejemplo el profesor.

“Por la gravedad”, contestan los estudiantes, sin agregar ninguna claridad al asunto. Decir “gravedad” no explica el fenómeno, simplemente lo nombra. Será importante entonces exponer a los estudiantes a las formas en que las ideas se desarrollan y evolucionan en ciencia, y tener un especial cuidado en cómo, cuándo y por qué se introducen en clase los términos técnicos, poniendo el énfasis en los fenómenos y conceptos involucrados y no en las palabras que los denotan.

Richard P. Feynman, un físico que fue galardonado con el Premio Nobel en 1965, cuenta que su forma de pensar (¡que era poderosísima!) fue muy influida por su padre, quien lo llevaba a caminar cuando era chico y le mostraba los pájaros y las plantas. El padre le decía: “No importa cómo se llama. Lo que importa es que es marrón con el pecho amarillo y del tamaño de un gorrión y vive en clima frío y...”. En otras palabras, lo importante eran las características físicas y el comportamiento del pájaro. Así, en otro lugar, en otro país y con otro idioma, se podía individualizar al pájaro sin tener que saber su nombre (claro está que a los efectos de la comunicación con otra gente, conocer el nombre del pájaro no está de más, pero ésa es otra cuestión).

Al ceñirnos lo más estrictamente posible a esta secuencia *fenómeno-idea-terminología*, estamos utilizando la secuencia lógica que sigue la investigación científica. Comenzando por la introducción de una serie de fenómenos, y permitiendo que los estudiantes se familiaricen con ellos mediante el juego y la exploración, se podrán desarrollar las ideas fundamentales de la unidad que se está estudiando. Pero será importante concentrarse en los conceptos y en las ideas sin darles nombres particulares sino usando palabras de todos los días que permitan describir lo que se ve. Recién cuando las ideas hayan sido comprendidas diremos: “Bueno, a esto que vemos aquí los científicos lo llaman…”. El uso de esta secuencia puede hacerse explícito a los estudiantes de modo que se sumen conscientemente al esfuerzo de pensar las ideas primero y disponer de los términos técnicos cuando sea adecuado.

Veamos, como ejemplo, una estrategia que hemos usado con éxito para introducir el tema de las fuerzas balanceadas. Les damos a los estudiantes globos inflados con helio y ganchitos para papel. Los ganchitos son para colgar del hilo que sujeta al globo y así agregarle peso. Les pedimos a los alumnos que traten de lograr, con ayuda de los ganchitos, que los globos no suban ni bajen sino que queden suspendidos a una determinada altura en el aire. Durante esta actividad se discute en qué condiciones los globos suben, en cuáles bajan y en cuáles alcanzan un equilibrio. En sucesivas clases se

expone a los alumnos a otros objetos en flotación y a los efectos balanceadores de los resortes. A partir de estas experiencias, hablamos luego de la cancelación de efectos, de la flotación, de cómo las superficies sólidas ejercen una fuerza contra los objetos que descansan en ellas... y todo ello sin introducir ningún término técnico. Al final, ponerle nombre (fuerza neta, fuerza normal, fricción, etc.) a esos fenómenos que ellos ya conocen bien por su propia experiencia resulta la parte más sencilla del proceso.

DEFINICIONES OPERACIONALES Y DEFINICIONES DE CORTE TEÓRICO

La incorporación del aspecto empírico de la ciencia en el aula no involucra solamente fenómenos, experimentos, prácticas de laboratorio u objetos reales. La manera misma en que definimos un término técnico tiene impacto en cómo y hasta qué punto incorporamos los aspectos empíricos de la ciencia en el aula. Así, si definimos un término mediante una receta de operaciones prácticas a seguir, estamos dando lo que se llama una *definición operacional* (Hempel, 1973). Una definición operacional incluye formas de medición y criterios inequívocos. Por ejemplo, si decimos que "velocidad" es "el cociente entre la distancia recorrida por un objeto en movimiento y el tiempo que le tomó a ese objeto recorrer esa distancia", está claro que la velocidad de un objeto se define mediante las siguientes operaciones: medir la distancia que recorre, determinar el tiempo que le lleva recorrerla y dividir el primer número por el segundo. Si contrastamos esta definición con otras "estilo diccionario", como "cuán rápido se mueve un objeto" o "celeridad en un movimiento uniforme", veremos claramente la base empírica de la definición operacional (Bateson, 1990; Maturana y Varela, 1984).

Existe otro tipo de definiciones sumamente importantes en ciencia y que no son operacionales: son las definiciones de corte teórico en las cuales un término se define dentro de un marco teórico determinado. Por ejemplo, la teoría atómica provee un marco de referencia para definir toda una serie de términos. Una "sustancia" es un "sistema compuesto de sólo un tipo de molécula". Un "elemento" es un "sistema compuesto de sólo un tipo de átomo". Estas definiciones no son operacionales, ya que se basan en conceptos teóricos previos y no en operaciones a realizar. Una definición operacional de "elemento" es: "un sistema que no puede ser descompuesto

mediante reacciones químicas en otros sistemas con propiedades distintas".[4] En otras palabras, si nos dan un frasco con un líquido desconocido y nos preguntan si se trata de un elemento, sólo tendremos que tratar de descomponerlo químicamente: si lo logramos, el líquido no es un elemento; si no lo logramos, el líquido es un elemento.

Los diferentes tipos de definiciones promueven distintos aspectos del conocimiento científico si son introducidos en el orden adecuado. La definición operacional, por su naturaleza, evoca nuestra experiencia sensorial y el espacio donde se realizan las operaciones (laboratorio, campo, etc.), y de esa manera nos fuerza a un punto de vista empírico. Las definiciones teóricas, en cambio, surgen como fruto de los cuerpos de teoría, los cuales por lo general son elaborados a fin de dar sentido a una vasta gama de observaciones o fenómenos primarios. Es decir que el orden natural en la construcción de las ideas científicas por parte de los investigadores va desde observaciones crudas a edificios cada vez más complejos de teorías que buscan aunar dichas observaciones. La introducción demasiado temprana de definiciones de corte teórico viola esta secuencia propia de la ciencia y redunda en la mistificación de los términos usados. Introducir términos basados en edificios teóricos que aún no han sido levantados por los estudiantes es forzarlos a aceptar un conjunto de ideas sin basamento racional, como conocimiento revelado en vez de construido. Las definiciones operacionales, por el contrario, refuerzan la idea de que los términos son usados para describir cosas concretas del mundo real. Ahondaremos en el tema de las construcciones teóricas al discutir los aspectos abstractos de la ciencia en la tercera parte de este libro.

EVOLUCIÓN DE LA TERMINOLOGÍA CIENTÍFICA

La terminología científica es dinámica: los términos se definen y redefinen a lo largo de la historia a medida que los científicos aprenden más sobre los fenómenos que estudian. Será interesante exponer a los estudiantes a esta vivencia de que los términos científicos evolucionan junto con nuestra comprensión de la realidad. Por ejemplo, una clase de dinámica

4. Esta definición asume que tenemos también definiciones operacionales de los términos "reacción química" y "descomposición", pero ambas definiciones son posibles sin utilizar el término "elemento".

puede comenzar usando una definición simple del concepto de fuerza, basada en la sensación física de nuestros músculos. Luego puede introducirse una definición dentro del marco aristotélico de pensamiento, como "aquello que mueve las cosas" o "sin fuerzas no se puede sostener el movimiento". Ésta puede evolucionar a tiempos galileanos aceptando el principio de inercia: "una fuerza es aquello que inicia o detiene el movimiento pero no es necesaria para mantenerlo". Así, a través de refinamientos puede llegarse a una definición que introduzca las leyes segunda y tercera de Newton y haga referencia a la aceleración. Normalmente los cursos de la escuela secundaria se detienen en esta definición como la correcta, pero un estudiante acostumbrado a percibir que las definiciones van cambiando a medida que refinamos nuestras ideas no se sorprenderá si en el futuro es necesario cambiarla una vez más para introducir más refinamientos teóricos (por ejemplo, "fuerza es aquello que cambia la cantidad de movimiento de un objeto, considerando a la masa como función de la velocidad").

Mostrar que los términos evolucionan en su significado es otra manera de bajar a las palabras de su pedestal de autoridad y convertirlas de a poco en nada más ni nada menos que herramientas de pensamiento y comunicación. Nuestros alumnos deberán apreciar que las palabras están al servicio de nuestro pensamiento y no al revés.

LAS EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

Hemos dicho que la secuencia que usamos para desarrollar una idea puede tener impacto en cuán ajustada estará la clase a los aspectos empíricos de la ciencia. Esto es especialmente cierto en el caso de las prácticas de laboratorio. Una práctica de laboratorio en la cual solamente se verifica lo que se estudió previamente en la clase teórica no promueve un pensamiento empírico. Por el contrario, sugiere que la verdad está en los libros o en la cabeza del profesor y que los experimentos son simplemente maneras de comprobar una de esas verdades, no una forma de descubrirlas. Una buena práctica en el aula es la de desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio y no al revés; en otras palabras, no utilizar las prácticas de laboratorio para demostrar o confirmar ideas desarrolladas en el pizarrón. Esta forma de proceder tiene la virtud de desterrar del aula la frase: "el experimento me dio mal". ¿Cómo puede "dar mal" un experimento? Solamente si se sabe de antemano cuál "debería"

ser la respuesta. Y aun así: si el experimento no dio el resultado esperado, se necesita hacer comprender al alumno que se obtuvo lo que tenía que dar *en las condiciones imperantes*. Quizá había un circuito mal armado –es decir, armado en forma distinta de la deseada– o tal vez la sustancia química usada no era pura como se creía sino que estaba contaminada. Buscar la fuente de la discrepancia entre el resultado real y el esperado es parte del hacer buena ciencia.

CONSTRUYENDO IDEAS "DESDE CERO"

Si quisiéramos respetar el aspecto empírico al máximo posible, deberíamos desarrollar actividades en las que las ideas se construyan "desde cero". En un programa de este tipo, los estudiantes empiezan usando sólo sus sentidos y su experiencia cotidiana, dejando conscientemente de lado conceptos y términos científicos escuchados o aprendidos previamente. Por ejemplo, una investigación sobre el movimiento de la Tierra y el Sol puede introducirse así: "Intentemos olvidarnos de lo que conocemos sobre cómo se mueven la Tierra y el Sol, y vamos a tratar de explicarlo a partir de lo que nos dicen nuestros sentidos, como si fuéramos antiguos exploradores del cielo". A partir de allí se desarrollan investigaciones o discusiones que van construyendo un tejido de conceptos: se suceden las observaciones, hipótesis y construcción de modelos hasta desarrollar las ideas buscadas. En este esquema no existe un texto "verdadero" y la información que brinda el docente es muy limitada.

En este tipo de trabajo los estudiantes avanzan por un proceso de descubrimiento guiado, altamente digitado por el diseño del programa de enseñanza. En este abordaje, igual que en la investigación científica real, los conceptos se construyen sólo por lo que la experiencia requiere o permite: no se usan fórmulas del estilo "esto ha sido probado por otros científicos" o "esto es así porque lo digo yo".

Existe un interesante programa de este tipo de abordaje "desde cero" que desarrolla todos los conceptos fundamentales de circuitos eléctricos (Steinberg *et al.*, 2004). Pero debe reconocerse que la creación de un programa de este tipo conlleva un trabajo formidable y supone múltiples evaluaciones con estudiantes.

LA DINÁMICA DE LA INDAGACIÓN EN EL AULA

Son numerosos los aspectos del trabajo en el aula que promueven la verdad revelada y hacen difícil un acercamiento empírico a la ciencia. Algunos son verdaderamente sutiles. Por ejemplo, el manejo de los tiempos puede tener un impacto considerable en la construcción de ideas de los alumnos. Pensar requiere tiempo, sobre todo en relación con la elaboración de explicaciones y de predicciones a la que nos referíamos más arriba. Y este tiempo no es uniforme: algunos alumnos requieren más tiempo que otros. Al trabajar con diálogos y preguntas orales es importante tener en cuenta la labor de la investigadora y docente estadounidense Mary Budd Rowe (1978), quien sostuvo, sobre la base de múltiples estudios, que luego de hacer una pregunta es necesario que el docente espere por lo menos tres segundos antes de volver a hablar y otros tres segundos después de la respuesta del alumno. Estos tiempos de espera mejoran mucho la calidad de los diálogos durante el proceso de indagación ya que le permiten al alumno interpelado elaborar su respuesta y, después de formularla, ampliarla y agregar comentarios. Sin embargo, las investigaciones muestran que muy pocos docentes cumplen con estos tiempos de espera y que, cuando los ponen en práctica, acostumbrados a esperas de menos de un segundo, esos tres segundos les resultan increíblemente largos.

¿Qué pasa con las brevísimas pausas que se les suelen dar a los alumnos para elaborar contestaciones? Sucede que, al no tener tiempo para pensar en una respuesta adecuada, la pregunta del docente se vuelve retórica y es seguida por la respuesta dada por el mismo docente. Así es como, al no dar lugar al proceso de construcción por parte del alumno, las ideas toman el carácter de verdades reveladas. Esto muestra hasta qué punto la dinámica de la relación entre alumno y docente desempeña un papel importante en el aprendizaje.

¿CÓMO RESPETAR EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA EN EL CASO DE FENÓMENOS QUE NO SE PUEDEN OBSERVAR EN EL AULA?

No siempre es posible exponer a los alumnos a los fenómenos naturales, especialmente cuando tratamos los aspectos más modernos de la ciencia. Los fenómenos que buscan entender los científicos no son sólo aquellos que vemos con nuestros ojos, tocamos con nuestras manos u oímos con nuestros oídos sino también todo aquello que detectamos mediante instru-

mentos que extienden nuestros sentidos (por ejemplo, telescopios para detectar lo que está muy lejano, microscopios para detectar lo que es muy pequeño, termómetros para detectar temperaturas muy altas o muy bajas). La ciencia actual describe la naturaleza de galaxias lejanas, el inicio del Universo, temperaturas impensables, velocidades inauditas, cosas que pasan dentro de nuestras células y que no podemos ver, y fuerzas que somos incapaces de experimentar con nuestro cuerpo. Sabemos ahora que la luz tiene colores (como el ultravioleta) que no somos capaces de distinguir con nuestros sentidos, porque nuestras investigaciones, teorías e instrumentos nos dicen que así es. El docente de ciencias debe ser extremadamente ducho (y al mismo tiempo cauto) para proveer la evidencia suficiente a fin de convencer al estudiante de que esas "cosas invisibles" existen.

¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de fenómenos que no podemos observar en el aula? El hecho de que no podamos observarlos no significa que no podamos describirlos. En todos estos casos, deberemos siempre hacernos estas sencillas preguntas: "¿Cómo sabemos que esto es así?" y "¿Cuál es la evidencia que sostiene esta o aquella afirmación?". A veces las evidencias empíricas de las ideas que afirmamos son fáciles de evocar o de imaginar, pero otras no. Por ejemplo, explicamos los fenómenos que vemos en circuitos eléctricos diciendo que se deben a un flujo de electrones dentro del cable. ¿Cómo sabemos que son electrones los que fluyen dentro del cable (o, para el caso, cómo sabemos que hay "algo" que fluye)? Una excelente práctica para todo docente de ciencias es tratar de indagar cuáles son las evidencias empíricas de cada concepto que se quiere enseñar. Esto muchas veces nos llevará a analizar en detalle los hechos históricos que condujeron a esas ideas.

La historia de la ciencia brinda ejemplos riquísimos acerca de cómo las ideas científicas se construyen a partir de la observación y exploración de fenómenos. Estos ejemplos históricos le dan vida al tema y muestran el drama y la pasión del descubrimiento. Por supuesto, no basta con decir que Boyle vivió en tal época y descubrió esto y aquello sobre los gases. Tendremos que ver cuáles eran las preguntas que se hacía, por qué eran relevantes, qué sabía y qué no podía saber, qué decían sus contemporáneos, qué mostraron sus experimentos, qué cosas sus experimentos *no* mostraron pero eran en principio posibles. Esto ayudará a mostrar que los científicos no consiguen las respuestas simplemente pensando: de alguna manera deben obtenerlas de la realidad.

En suma, para poder aprender a pensar científicamente los estudiantes deben comprender cómo los investigadores formulan ideas para explicar la

realidad que percibimos. No basta con decirles a los estudiantes que la ciencia es empírica; es necesario modelar ese "empiricismo" en cada paso que demos en el aula. Al mismo tiempo, deberemos estar alertas acerca de qué tipo de conductas del docente contradicen el espíritu empírico de la labor científica. Hemos identificado algunas de esas actitudes y hemos propuesto, a lo largo de este capítulo, formas de crear actividades y ambientes en el aula que promuevan tal espíritu.

Para finalizar, resumiremos en el siguiente apartado estas sugerencias, a las cuales cada docente podrá agregar las propias. En los capítulos 2 y 3 discutiremos en detalle dos ejemplos concretos de cómo introducir el aspecto empírico en el aula de ciencias. El capítulo 2 gira en torno del mundo de los fenómenos en la clase de química. En el capítulo 3 se brinda una guía de preguntas para enmarcar actividades destinadas a construir el concepto de carga eléctrica.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA

- Brindar la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre ellos.
- Usar la secuencia "fenómeno-idea-terminología" al explorar un tema.
- Utilizar preferentemente definiciones operacionales en lugar de definiciones de corte teórico.
- Modificar o refinar conceptos y definiciones de términos sobre la base de nuevas observaciones o ideas.
- Desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio.
- Usar actividades de exploración guiadas que arranquen "desde cero", es decir, fomentando que los estudiantes construyan sus ideas de acuerdo con lo que perciben.
- Prestar atención a la dinámica del aula; por ejemplo, brindando suficiente tiempo a los alumnos para que piensen y elaboren sus respuestas a las preguntas del docente.
- Poner especial atención en indagar la evidencia empírica que lleva a formular conceptos cuando se trata de fenómenos no observables en el aula.
- Considerar casos históricos, analizando la secuencia de desarrollo de una idea a partir de las observaciones y experimentos e incluyendo la definición y redefinición de términos.

2

REACCIONES QUÍMICAS: UNA EXPLORACIÓN LÚDICA

En el capítulo anterior hemos discutido una serie de posibles actitudes y actividades que, a nuestro entender, promueven una enseñanza que enfatiza el aspecto empírico de la ciencia. Elaboraremos aquí un ejemplo concreto en el que se brinda la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre qué significan o por qué suceden. Veremos el modo en que esta exploración conduce al desarrollo y a la comprensión de conceptos.

El ejemplo que presentamos en este capítulo consiste en experiencias y observaciones que los alumnos efectúan en forma relativamente libre y lúdica, y a partir de los cuales se desarrolla la idea de "reacción química". En las exploraciones y discusiones se comenzará usando la secuencia fenómeno-idea-terminología (propuesta en el capítulo 1) para caracterizar una mezcla de sustancias. Luego, sobre la base de nuevos experimentos y observaciones, se modificará y refinará la idea de "mezcla" para llegar a definir, en forma operacional, una reacción química.

¿CÓMO DEFINIR UNA REACCIÓN?

En la enseñanza de la química es de primera importancia definir y caracterizar una reacción química. Sin embargo, esto no es una tarea fá-

cil. Si optamos por decir que una reacción química es un proceso en el cual las sustancias constituyentes cambian y se transforman en otras sustancias, tendremos el problema posterior de definir qué entendemos por “sustancia”. A su vez, la definición de sustancia por lo general invoca la idea de reacción química y se entra así en un pensamiento circular. Una buena definición (operacional) podría lograrse si consideramos que en una reacción química las propiedades del sistema varían significativamente. Supongamos, como ejemplo de trabajo, que mezclamos dos líquidos. Podemos decir que ocurre una reacción química si las propiedades del sistema resultante no son predecibles a partir de las propiedades de los dos líquidos originales (por ejemplo, si vemos aparecer un gas u ocurre un cambio de color). Normalmente adscribimos propiedades particulares a ciertas sustancias, es decir, llamamos sustancia tal o cual a un sistema que tiene ciertas propiedades características. Justamente cuando en un fenómeno las propiedades varían dramática e inusitadamente llegamos a la conclusión de que las sustancias en el sistema deben de estar cambiando. Nadie ve a las sustancias cambiar, sino que detectamos cambios en las propiedades del sistema.

En el primer acercamiento a la química, entonces, es esencial exponer a los estudiantes a las propiedades de diferentes sustancias: metales, sales, agua, alcohol y otros solventes y, si es posible, gases como el oxígeno y el dióxido de carbono. También es importante exponerlos a los diferentes tipos de interacciones que ocurren cuando dos sustancias (o sistemas) se ponen en contacto. Sin este conocimiento directo, experiencial, las discusiones posteriores, más abstractas, acerca de qué es o no es una sustancia o una disolución o una reacción química, resultan incomprensibles.

Más adelante describiremos una actividad basada en un juego de competencia con mezclas de alcohol y agua, y una actividad exploratoria de laboratorio a fin de distinguir entre disoluciones y reacciones químicas en estado líquido. Mediante estos juegos y exploraciones los estudiantes toman contacto con los fenómenos primarios sobre los que se basan los conceptos químicos fundamentales. En vez de hablar primero de estos conceptos bastante difíciles, se presentan los fenómenos sin mucha explicación; la experiencia ganada es la plataforma de lanzamiento para discusiones posteriores.

DISOLUCIONES Y REACCIONES QUÍMICAS

Desde el punto de vista de los contenidos curriculares, las actividades aquí propuestas preparan el terreno para discutir rigurosamente qué tipo de interacciones pueden sufrir dos sistemas materiales al ser puestos en contacto.

En un caso, la interacción no produce efectos: los sistemas permanecen intactos y, aunque puede resultar aburrido, es esencial subrayar la posibilidad de este resultado "trivial". Un ejemplo es poner una bolita de vidrio en un vaso con agua: nada le pasa a la bolita o al agua. En un segundo caso los dos sistemas se mezclan íntimamente y se produce lo que llamamos una solución. En este proceso las propiedades de la mezcla se asemejan a las propiedades de los sistemas originales y dependen de la cantidad relativa de cada uno de los componentes. Por ejemplo, en el caso de una solución de sal en agua, si ponemos más sal en el agua, la solución será más salada; si ponemos más agua, será más acuosa. Una tercera posibilidad es que suceda algo inusitado: mezclamos dos líquidos rojos y el resultado es verde; juntamos dos líquidos incoloros y el resultado es un sólido amarillo. Las propiedades nuevas, aducimos, son el resultado de la presencia de nuevas sustancias que no estaban presentes en los sistemas originales y que aparecen a partir de la interacción de estos sistemas. Esto es lo que llamamos reacción química.

Sugerimos a continuación una forma de poner en contacto a los estudiantes con estas dos últimas interacciones: la disolución y la reacción. Pero es importante notar que este juego propuesto debe realizarse antes de introducir los conceptos discutidos. El juego es precisamente esa introducción.

Actividad 1: ¿Cuál es la mezcla?

Para esta actividad se les pedirá a los alumnos que formen grupos de dos o tres integrantes, y que cada grupo obtenga tres soluciones diferentes de alcohol y agua. Una de ellas contendrá 25% del volumen de alcohol y 75% del volumen de agua.[1] Otra tendrá la composición opuesta: 25% de agua y 75% de

1. Los volúmenes de alcohol y agua no son exactamente aditivos, pero como la diferencia en este caso no altera significativamente el resultado del juego no la tendremos en cuenta.

alcohol. La última tendrá 50% de cada uno de los líquidos. Si se desea, se pueden agregar al juego agua pura y alcohol puro. En todos los casos, será preferible usar alcohol absoluto o 96% y tratar de evitar otras graduaciones.

Luego, cada grupo pondrá sus mezclas en frascos que etiquetará de manera misteriosa: “X, Y y Z”, “María Laura, María Eugenia y María Emilia”, o cualquier otro nombre de fantasía. Una vez logrado esto, cada grupo intercambiará las muestras con otro equipo. La consigna del juego es identificar a qué mezcla corresponde cada muestra.

Para identificar las muestras, los estudiantes deberán recurrir a las propiedades conocidas del agua y del alcohol. A fin de que la actividad sea exitosa, los estudiantes tienen que estar familiarizados con la idea de densidad y tienen que haber experimentado con algunas de las propiedades distintivas del agua y del alcohol, en particular con la inflamabilidad del último.[2] Las propiedades clave a medir serán precisamente la densidad de la mezcla y su inflamabilidad. También es posible medir la capacidad calorífica, pero esto supone cierto conocimiento sobre el tema “calor”.[3] El docente podrá probar qué otras propiedades dan resultados mensurables y se adaptan a su programa.

A fin de medir la densidad de cada muestra, los miembros de cada grupo procederán del siguiente modo. Primero verterán la muestra en una bureta graduada. Luego usarán la bureta para verter un volumen determinado, medido con la mayor precisión que ésta permita, en un vaso de precipitados tarado previamente, y lo pesarán en una balanza. A partir de las mediciones de volumen y masa se puede calcular la densidad.

La inflamabilidad de las mezclas puede ponerse a prueba en recipientes de boca ancha. Es preferible usar volúmenes pequeños en superficies relativamente amplias, como la de un vidrio de reloj, e intentar encenderlas. Los estudiantes no realizan una medición de la inflamabilidad sino que efectúan una estimación cualitativa que permite hacer comparaciones a fines de identificar las mezclas. Para ello es clave realizar comparaciones más o menos directas. Una posibilidad consiste en quemar las tres mezclas al mismo tiempo y ver cuál o cuáles se encienden, cuán sencillo

2. Existen numerosas formas de introducir estas propiedades de maneras explorativas o lúdicas; ver por ejemplo el caso de la “bola de aceite” en Furman y Zysman (2001).

3. En caso de medir capacidad calorífica, debe tenerse cuidado, por supuesto, de no usar un mechero cuando se tienen sustancias inflamables alrededor.

es encender cada una o cuánto tiempo duran encendidas, o comparar cada una con alcohol puro. O, mejor aún, puede dejarse a los alumnos proceder libremente y criticar sus abordajes a medida que ocurren, mediante diálogos socráticos.

Una manera de visualizar los resultados de las actividades realizadas es volcarlos en una tabla como la que exponemos a continuación. La densidad e inflamabilidad de las mezclas son fácilmente ordenables. Los estudiantes pueden establecer la identidad de las mezclas porque reconocen, aunque no sean enteramente conscientes de ello, que las propiedades de las mezclas son intermedias entre las propiedades de las sustancias originales. Nótese que no se trata simplemente de que observen sustancias entrando en disolución, sino que adviertan la noción, no necesariamente evidente, de que ciertos sistemas materiales, al ser mezclados, forman un sistema con propiedades intermedias con respecto a las de los sistemas originales. A este tipo de interacción entre sistemas líquidos se la denominará, más adelante, "mezcla" o "disolución". De esta manera, el concepto ha arribado primero, y la terminología vendrá después.

Tabla 1.1. Modelo de tabla para volcar los resultados de los experimentos

Muestra	*Densidad (en gramos/ mL)*	*Inflamabilidad (estimada desde 0 a ++++)*	*Identidad de la muestra*
Alcohol puro	0, 78	++++	
Agua	1	0	
Muestra 1			
Muestra 2			
Muestra 3			

Actividad 2: ¿Qué va a pasar cuando mezcle estos líquidos?

En la clase siguiente se ofrecerá a los estudiantes una serie de frascos con distintos líquidos con etiquetas de fantasía. El docente les pedirá que realicen ciertas mezclas. Algunos de los líquidos se mezclarán pero otros reaccionarán químicamente. Nada de esto les será revelado por anticipado a los estudiantes. Por ejemplo, se usarán soluciones de colorantes de alimentos, que pueden ser mezcladas sin reacción de ningún tipo. Pero también se utilizarán, por ejemplo, soluciones de tiocianato de potasio y nitrato de hierro, que son incoloras pero al ser mezcladas producen un profundo color rojo sangre. Más abajo incluimos una breve lista de algunas posibles soluciones o productos químicos que reaccionan de manera vistosa.

En primer lugar se les pedirá a los alumnos que mezclen un líquido azul con otro incoloro. Nosotros usamos una solución de sulfato de cobre y agua, pero cualquier colorante de alimentos puede servir. Luego se les pide que describan qué sucede. Algunos suelen decir que no sucede nada. Otros, que la mezcla tiene un color más suave, más diluido. "¿Es esto lo que esperaban?", les preguntará el docente.

Se les pedirá entonces que mezclen otros dos líquidos, uno azul y otro amarillo, y que predigan de qué color será la mezcla. Ambos serán soluciones de colorantes o tinta china, pero los estudiantes no lo sabrán. "Verde", será la respuesta. Al mezclarlos, en efecto, obtendrán verde.

Les pediremos a continuación que mezclen dos líquidos incoloros y que predigan qué sucederá. "Ningún cambio", será seguramente la respuesta. Pero en este caso el resultado será rojo profundo. Ante esto, se suelen oír exclamaciones de sorpresa. El docente puede detenerse aquí y poner de relieve la diferencia entre ambos procesos. En un caso podemos predecir qué sucederá porque, como pasó con las mezclas de alcohol y agua, las propiedades resultantes son intermedias con respecto a las de los líquidos originales. En el otro caso, las propiedades son inesperadas y no guardan relación con las propiedades originales. Podemos interpretar este resultado aduciendo que han aparecido nuevas sustancias. A este proceso le daremos el nombre de reacción química. Lo importante será que los estudiantes internalicen sus observaciones y tomen conciencia de que los resultados son cualitativamente diferentes en un caso (el de las mezclas) y en el otro (el de la reacción química).

La siguiente tabla ofrece una serie de posibles sistemas líquidos y sus comportamientos al ser combinados.

Tabla 1.2. Resultados de las combinaciones de sistemas líquidos

Líquido 1	*Aspecto*	*Líquido 2*	*Aspecto*	*Resultado que se obtiene*
Agua	Incoloro	$CuSO_4$ (*aq*)	Azul	Azul más claro
Amoníaco	Incoloro, olor fuerte	$CuSO_4$ (*aq*)	Azul	Azul oscuro y profundo
KSCN (*aq*)	Incoloro	$Fe(NO_3)_3$ (*aq*)[4]	Incoloro	Rojo sangre
KOH (*aq*)	Incoloro	$Fe(NO_3)_3$ (*aq*)	Incoloro	Naranja
$CaCl_2$ (*aq*)	Incoloro	Na_2CO_3 (*aq*)	Incoloro	Turbidez blanca
Tinta azul	Azul	Tinta amarilla	Amarilla	Verde

La actividad prosigue con casos que corresponden a cada una de las categorías mencionadas (reacciones químicas y mezclas). Los estudiantes se familiarizan con estos fenómenos y a la vez se maravillan con algunos de los cambios químicos más llamativos. En una etapa final, aún más lúdica, los estudiantes pueden empezar a realizar mezclas no previstas por el docente y "ver qué pasa". En cada paso, el docente puede preguntar: "¿Ésta es una disolución o una reacción química?", "¿Cómo pueden saberlo?".

Según nuestra experiencia, la actividad es más rica cuanto menos estructurada sea. Una exploración libre, con abundante diálogo entre el docente y el alumno, provee innumerables oportunidades de ayudar a los estudiantes a agudizar su capacidad de observación y su espíritu curioso, además de llamar la atención sobre los fenómenos clave.

4. Esta solución de nitrato de potasio es naranja a pH neutro, e incolora en acidez; al prepararla debe agregarse ácido nítrico hasta que el color desaparezca. Una buena concentración de trabajo es de 0,05 M.

Sin embargo, está claro que el docente debe guiar las actividades. En este sentido, las siguientes son preguntas que pueden servir para redondear el tema y prepararlo para discusiones futuras:

- ¿Qué quiere decir que dos sistemas materiales interactúan entre sí?
- ¿Qué tipo de interacciones diferentes pueden ocurrir entre dos sistemas líquidos de acuerdo con lo que viste y discutiste en el laboratorio?
- El alcohol y el agua ¿se disuelven entre sí o reaccionan químicamente para producir una o varias nuevas sustancias? ¿Cuál es tu evidencia para afirmar tal cosa?
- Da tres ejemplos de disoluciones y tres de reacciones químicas que no hayas estudiado en el laboratorio sino que hayas encontrado en tu vida diaria. ¿Qué es lo que te lleva, en cada caso, a afirmar que es una o la otra?

CONCLUSIÓN

En resumen, hemos visto en este capítulo cómo dos juegos en el laboratorio de química nos permiten exponer a los estudiantes a una serie de fenómenos conducentes a la construcción de una determinada idea científica. No se trata de prácticas tradicionales de laboratorio para demostrar aquello que se estudió en una clase teórica, sino más bien de exploraciones que abren las puertas a posteriores comprensiones. Las observaciones no son azarosas o caprichosas sino que, por el contrario, los juegos están precisamente diseñados para conducir a los estudiantes a observar aquello que es relevante para el tema. La actividad permite jugar no sólo con los materiales físicos sino con las ideas involucradas. Las actividades aquí presentadas corresponden a contenidos curriculares específicos y también tradicionales, pero su tratamiento busca ser coherente con el aspecto empírico de la ciencia. Esto se logra básicamente mediante la exposición de los alumnos a los fenómenos de primera mano así como a través del uso de definiciones operacionales y la introducción cuidadosa de terminología una vez que los estudiantes se han familiarizado con los conceptos clave.

Este tipo de estrategias puede usarse para desarrollar otros temas de las más variadas formas. En el capítulo siguiente veremos cómo desarrollar un tema complejo (el de carga electrostática) a partir de observaciones y a través de secuencias de preguntas que guían una exploración empírica.

3

CARGA ELECTROSTÁTICA: UNA SECUENCIA DE ACTIVIDADES GUIADAS

En este capítulo describiremos una estrategia didáctica que promueve la exploración y el desarrollo de un tema –el concepto de carga electrostática– mediante una secuencia de actividades guiadas por preguntas. La característica central de esta secuencia es que las ideas se construyen "desde cero", es decir, a partir de la experiencia sensorial y sin invocar terminología técnica ni conocimientos previos por parte de los alumnos.

Las actividades aquí descriptas están diseñadas como una secuencia estricta: en cada etapa se realizan ciertos descubrimientos que son necesarios para continuar. Cada actividad está planificada para durar por lo menos una clase, pero esto variará de acuerdo con las necesidades particulares del docente y sus alumnos.

La secuencia didáctica incluye actividades de exploración tipo laboratorio, en las que se experimenta con objetos (con cinta adhesiva, para ser más precisos), y discusiones en grupos reducidos o con la participación de la clase en su totalidad. La última actividad de la secuencia, que los alumnos realizan en sus casas, es un repaso de todo lo visto. Las actividades varían en objetivos y modalidad, pero tienen un formato común: todas ellas se basan en una serie de preguntas que guían el desarrollo de las ideas por parte de los estudiantes. La secuencia didáctica puede ser vista, entonces, como una larga serie de preguntas que guían

la exploración de ciertos fenómenos hasta alcanzar la construcción de determinados conceptos.

Las preguntas están dirigidas a inducir las reflexiones deseadas en el momento oportuno. Sin embargo, es parte de la tarea del docente decidir cuándo apartarse de la secuencia sugerida y cómo hacer hincapié en las ideas que quiere desarrollar mediante discusiones y diálogos. Lo que el docente sí debe evitar es la tentación de develar el misterio que se está desenvolviendo, o sea que debe asegurarse de no suministrar respuestas antes de tiempo o interferir demasiado en las exploraciones de sus estudiantes.

Las guías correspondientes a las actividades figuran dentro de recuadros. A continuación de cada guía el lector encontrará una discusión que incluye los objetivos de cada una de las preguntas y las respuestas esperadas. Las guías están diseñadas para alumnos de catorce o quince años en adelante, en equipos de tres o cuatro integrantes

Dado que una de las características principales de estas guías, desde el punto de vista pedagógico, es que están diseñadas para construir el conocimiento deseado "desde cero", no se requiere que los estudiantes posean conocimientos científicos previos para llevarlas a cabo. Es más, si tienen conocimientos previos sobre el tema, se espera que puedan dejarlos deliberadamente a un lado. No se usarán términos técnicos excepto aquellos que se definan en clase sobre la base de fenómenos observados. Las ideas manejadas se derivarán de las experiencias de laboratorio, mientras que las observaciones de todos los días (hechas fuera del aula) serán admisibles sólo si son compartidas por todos los alumnos: el conocimiento "privado" no será una forma válida de argumentar ni para los alumnos ni para el profesor. El uso de todas estas prácticas fomenta la generación de un clima de fiel respeto del aspecto empírico de la ciencia, en el cual la verdad revelada no tiene valor y el conocimiento se deriva de la experiencia.

BREVE HISTORIA DEL CONCEPTO DE "CARGA"

El diseño de la secuencia de actividades tiene en cuenta la cronología de los descubrimientos en el área. Conviene, entonces, repasar algo de la historia de cómo evolucionó el concepto de carga. Incluimos la presente reseña histórica no para el conocimiento del estudiante sino del docente. Los

puntos interesantes pueden ser incluidos en clase como comentarios del docente. Nos centraremos en los conceptos relevantes para las actividades desarrolladas en las guías.

Inicios

Los fenómenos electrostáticos eran conocidos en la Antigüedad por griegos y romanos, quienes sabían que al frotar ámbar y otros materiales éstos adquirían la propiedad de atraer objetos livianos. Esta propiedad recordaba a las atracciones magnéticas. Durante el Renacimiento comenzó a ser evidente que el magnetismo y el "efecto ámbar" eran cosas distintas. El inglés William Gilbert (1544-1603) estableció que muchos materiales adquieren la capacidad de atraer trozos de papel al ser frotados. Gilbert denominó "eléctricos" a estos materiales, tomando prestada del griego la palabra *elektron*, que significa simplemente "ámbar".

Dos tipos de electricidad

El francés Charles François de Cisternay du Fay, mejor conocido como Dufay (1698-1739), realizó una serie de generalizaciones de enorme agudeza. Dice Dufay: "Un cuerpo electrificado atrae a todos aquellos cuerpos que no estén a su vez electrificados, y los repele tan pronto como los toca porque les transmite su electricidad".

Dufay razona que dos objetos electrificados se repelen si uno de ellos le otorgó la electricidad al otro. Se pregunta entonces qué sucederá con dos objetos electrificados independientemente. Se lanza a experimentar con toda clase de objetos electrificados y realiza un descubrimiento trascendente: ciertos objetos electrificados se repelen, pero otros se atraen. Mediante experimentos y razonamientos penetrantes llega a la conclusión de que existen dos tipos de electricidad distintos. Dos objetos con la misma electricidad se repelen mientras que dos objetos con electricidades distintas se atraen. Dufay denomina a estos dos tipos de electricidad "vítrea" y "resinosa".

¿Dos fluidos o uno solo?

En la época de Dufay se consideraba a la electricidad como un fluido, aunque a partir de sus descubrimientos comienza a hablarse de dos fluidos eléctricos distintos. Los cuerpos no electrificados, se especula, contienen los dos fluidos por partes iguales mientras que en los objetos electrificados hay un exceso de alguno de los dos tipos. En los Estados Unidos Benjamin Franklin realizó numerosos experimentos con carga eléctrica, los cuales culminaron, entre otras cosas, con la invención del pararrayos; sin embargo, su contribución más importante consistió en determinar que, cada vez que un objeto adquiere carga al ser frotado, otro objeto adquiere una carga equivalente pero de otro tipo. Franklin asumió esto como evidencia de que sólo existe un tipo de fluido eléctrico: un exceso de fluido produce un tipo de electricidad y una carencia del fluido produce el tipo opuesto. Por esta razón Franklin habló de carga positiva (exceso de fluido) y carga negativa (deficiencia de fluido). Sus resultados también ponen de manifiesto que la carga eléctrica, cualquiera que sea su tipo, no puede ser creada ni destruida.

Al suponer que existía un solo fluido eléctrico surgían dificultades para explicar ciertos fenómenos (por ejemplo, por qué dos objetos cargados negativamente se repelen, si se supone que carecen de fluido eléctrico), por lo que, con el correr del tiempo, esta idea fue abandonada. La teoría de los dos fluidos cobró fuerza, pero los nombres *vítreo* y *resinoso* fueron sustituidos por los términos *positivo* y *negativo* (y sus respectivos símbolos + y –). En esa época se decidió que la carga negativa correspondería a la electricidad resinosa y que la carga positiva correspondería a la electricidad vítrea. Esta decisión es puramente arbitraria.

Las guías de preguntas de este capítulo buscan desarrollar los conceptos de carga hasta este punto en la historia. A partir de entonces, el estudio de la electricidad prosiguió de manera cada vez más acelerada. Coulomb introdujo la cuantificación de las interacciones eléctricas. Cuando Volta inventó la pila se iniciaron los estudios de cargas que se mueven dentro de alambres conductores y una serie de fenómenos relacionados. Son estos fenómenos los que normalmente asociamos con la palabra electricidad: la corriente eléctrica, los motores, los generadores y las bombitas de luz. El estudio de la naturaleza íntima de la carga eléctrica condujo al descubrimiento de las partículas subatómicas y de la estructura interna del átomo. La consolidación de los fenómenos magnéticos y eléctricos brindó una ex-

plicación coherente de la naturaleza de la luz. Ninguno de estos desarrollos será tratado en el presente capítulo.

CONCEPCIONES PREVIAS DE LOS ESTUDIANTES

Al embarcarse en el estudio de la carga electrostática es importante tener en cuenta cuáles son las concepciones previas que los estudiantes tienen del tema y cuáles son los caminos de pensamiento que tienden a seguir. Esto alertará al docente sobre algunas de las dificultades con las que probablemente tropiece al implementar la secuencia didáctica de este capítulo.

Todos hemos tenido alguna experiencia con la electricidad estática. Muchos alumnos saben que cuando caminan en ciertas alfombras o al bajarse del coche con frecuencia sufren un pequeño *shock* o ven chispas, y se refieren a esto con el nombre de “electricidad”, “estática” o “carga”. Sin embargo, confunden la electricidad estática (fenómenos de atracción o repulsión de cargas estacionarias) con la corriente eléctrica (fenómenos debidos a las cargas en movimiento en circuitos eléctricos). El hecho de que la palabra “electricidad” se aplique a los dos conjuntos de fenómenos no hace más fácil la tarea docente, pues la evidencia que los une es difícil de obtener en esta etapa del colegio secundario. Muchos alumnos creen que las pilas pueden atraer objetos porque “están cargadas” (en realidad, los polos de las pilas sí tienen una carga, pero en las pilas comerciales la carga es demasiado pequeña como para ver sus efectos). Algunos estudiantes creen que si una lamparita de luz se pone en contacto con un objeto cargado, ésta se encenderá. Arons (1997b, pág. 169) comenta que muchos alumnos creen que la carga es “algo” (¿un líquido?) que sale de los enchufes.

Otra de las ideas erróneas que los estudiantes suelen llevar a clase, y que surge con frecuencia en el tratamiento de los fenómenos eléctricos, tiene que ver con la “energía”, uno de los términos más abusados y peor entendidos en clases de ciencia. Los estudiantes creen que “energía” es una sustancia que fluye dentro de los circuitos eléctricos y es almacenada dentro de las pilas. Como tarde o temprano alguien les dice que lo que fluye dentro de los circuitos es “electricidad”, tienden a usar las palabras “energía” y “electricidad” como sinónimos, y a confundir ambas con “carga”. Es casi imposible desenredar esta madeja a través del estudio de sólo uno de estos

temas, pero es importante que el docente esté advertido y trate de establecer el uso correcto de la terminología. "Carga" y "electricidad" se usaron por más de cien años en forma indistinta, de modo que, si bien actualmente los términos tienen connotaciones diferentes, ésta es una confusión permisible que puede ser corregida más adelante. Pero es conveniente omitir la palabra "energía" para ahorrar problemas futuros. Si los alumnos usan este término en forma errónea, se les puede decir simplemente: "No, eso no significa energía; por ahora no sabemos qué es energía pero no confundamos las cosas... Los científicos ya reservaron la palabra energía para nombrar algo distinto".

A continuación se presentará una secuencia de cuatro actividades guiadas para desarrollar el concepto de carga electrostática. Cada actividad cuenta con una "Guía de preguntas" que describe la actividad a realizar. Cada alumno deberá contar con su propia copia. La actividad se discute a continuación de cada guía.

ACTIVIDAD 1: OBSERVACIONES BÁSICAS

En la primera actividad la guía busca que los estudiantes observen cuidadosamente las propiedades de objetos cargados, que atraen y son atraídos por cualquier otro objeto, pero que se repelen a sí mismos, u otro objeto cargado idénticamente.

Guía de preguntas

Actividad 1: Experimentos con cintas adhesivas[1]

Para esta actividad tenés que concentrarte en observar. El objetivo de la actividad es describir lo que ves, y no (por ahora) explicarlo.

1. Si bien los experimentos funcionan con cualquier cinta adhesiva de celofán transparente, las llamadas "cintas mágicas", que son más bien blancuzcas y translúcidas, son ideales y permiten obtener resultados más evidentes.

1. Pegá un pedazo de cinta adhesiva transparente (unos 20 cm) en tu escritorio o mesada. Pasá la uña por encima para asegurarte de que esté bien pegado. Ahora, tomándolo de una punta, despegalo de un tirón. Todavía sosteniéndolo de una punta, acercalo a diferentes objetos (pero tratá de que no toque los objetos… no hay problema si los roza). ¿Qué pasa?
2. ¿Se manifiesta esta propiedad en cualquier objeto? Es decir, ¿pasa lo mismo con cualquier cosa a la que acerques la cinta?
3. ¿Es permanente esta propiedad? ¿Qué podés hacer para que desaparezca? ¿Qué ocurre cuando la cinta toca tus manos u otros objetos?
4. Pegá dos trozos de cinta adhesiva en la mesa o pupitre, uno al lado del otro. Despegalos de un tirón. Probá cada una de las cintas por separado acercándolas a objetos y asegurate de que no pierdan su nuevo poder. Ahora acercá las cintas una a la otra. ¿Qué sucede? ¿Qué pasa si doblás una cinta por la mitad (ojo: con la parte engomada para afuera)? ¿Cómo interactúan las dos puntas?

Comentario de la Actividad 1

Al realizar estas experiencias los estudiantes encontrarán que:

- La cinta adhesiva tratada de la manera descripta es atraída por los objetos: partes del cuerpo, sillas, mesas, pizarrón, útiles, e incluso un chorro de agua.
- La propiedad no es permanente.
- La propiedad de atracción se pierde con el contacto con otros objetos.
- Dos cintas tratadas de esta manera se repelen.
- Dos puntas de la misma cinta se repelen.

Habrá que recordar a los alumnos al completar esta primera guía que las preguntas no apuntan a resolver por qué ocurren estos fenómenos; lo que se busca es una descripción de lo observado. Puede suceder que algunos alumnos se apresuren a comentar que la cinta adhesiva está “cargada”. Es deseable que el docente desaliente estas ansias por nombrar lo que observan, porque con mucha frecuencia, como ya se mencionó en el capítulo 1, los estudiantes confunden nombrar con explicar o entender.

Una forma de desalentar esta práctica consiste en recordar a los alumnos que primero es importante ver qué pasa y que “los nombres los daremos luego”. Este recordatorio ayuda a establecer ciertas reglas de juego desde el comienzo.

Otra posibilidad, más riesgosa, consiste en preguntarle: “¿Qué quiere decir que está cargada?”. Con frecuencia los estudiantes tomarán conciencia de que en realidad no saben qué quiere decir “cargado”. La definición operacional es que un objeto cargado es aquel que a través del frotamiento ha adquirido la capacidad de atraer otros objetos. En todo caso, decir que este objeto está cargado no agrega nada; es simplemente una manera de nombrar lo que vemos.

Pero puede suceder que algún otro alumno explique que la cinta tiene ahora un exceso o un defecto de electrones. Si esto sucede se abre una serie de interrogantes: ¿qué quiere decir “electrón”?, ¿cuál es la evidencia de que la cinta tiene exceso o defecto de esas entidades? Es posible que un alumno muy versado en este tema dé una respuesta de libro y defina al electrón como partícula subatómica. A cada comentario de este tipo el docente puede preguntar: “Pero ¿cómo sabés que esto es así?”. Tarde o temprano el alumno probablemente admitirá que simplemente está repitiendo lo que leyó u oyó y que no tiene evidencia empírica de lo que dice.

La pregunta 2 (“¿Se manifiesta esta propiedad en cualquier objeto?”) invita a los estudiantes a explorar el alcance de esta propiedad. El docente puede proponer ensayos e invitar a los estudiantes a explorar: “¿Probaste con madera, vidrio o agua?”.

Al jugar con las cintas adhesivas los estudiantes notarán que el poder atractivo de la cinta se desvanece. La pregunta 3 (“¿Es permanente esta propiedad? ¿Qué podés hacer para que desaparezca?”) brinda la oportunidad de que los estudiantes hagan explícitas sus hipótesis y diseñen experimentos para confirmarlas o refutarlas. Por lo general los estudiantes producen variaciones de tres hipótesis: 1) que el poder atractivo se desvanece con el uso, es decir, cada vez que se ejerce una fuerza de atracción, el objeto “gasta” parte del poder; 2) que el poder atractivo simplemente desaparece con el tiempo; 3) que el poder atractivo desaparece cuando el objeto toca otros objetos. Técnicamente, la última hipótesis es la correcta y es importante que así lo reconozcan para el desarrollo futuro de las ideas. Pero también es cierto que las cintas no están nunca totalmente aisladas y, aunque parezca que no están en contacto con otros objetos, pueden perder su poder atractivo con relativa

rapidez por contacto con el agua en el aire si las condiciones atmosféricas son muy húmedas.

El docente debe promover una actitud experimental, con preguntas del estilo: "¿Cómo harías para saber si la propiedad se pierde por contacto o simplemente por el pasaje del tiempo?". Un ejemplo de experimento consiste en despegar dos cintas simultáneamente y colgarlas de otro objeto (el borde del pupitre); una de las cintas debe dejarse sin contacto alguno mientras que se toca la otra con la mano, con una regla, etc. Se verifica que, cuando la segunda pierde el poder atractivo, la otra aún lo conserva.

Los experimentos de esta actividad culminan con el estudio de la interacción de dos cintas tratadas de idéntica manera. Las cintas se repelen. En conversaciones con los estudiantes puede subrayarse lo inusitado de este resultado. Si las cintas atraen todo, ¿no deberían atraerse mutuamente con mayor intensidad? Es una pregunta válida, pero su respuesta está todavía fuera de nuestro alcance. Por el momento la tarea consiste en describir lo que se observa y la repulsión es, simplemente, una de las propiedades de este tipo de interacción. Al final de la actividad puede ser oportuno acordar un nombre para el efecto observado. Nosotros usamos el nombre "efecto ámbar" que fue el que Gilbert usó originalmente.

En su resumen los alumnos deberán notar que:

- Cuando una cinta se despega de una mesa, atrae a todos los objetos (excepto otras cintas tratadas de la misma manera).
- Dos cintas que tienen poder atractivo se repelen mutuamente.
- Las cintas pierden su poder atractivo al tocar otros objetos.

ACTIVIDAD 2: DOS TIPOS DE CARGA

En esta actividad los alumnos cargarán las cintas adhesivas de dos formas distintas y encontrarán que se comportan de manera distinta. Esto conduce a la conclusión de que existen al menos dos maneras de cargar una cinta, o dos "sabores" o formas de carga. La guía de preguntas tratará de hacerlos reflexionar sobre la posible existencia de más de dos tipos distintos de carga. El fracaso en encontrarlos forzará la conclusión de que sólo existen dos tipos de carga, a las que no se denominará positiva y negativa sino con nombres de fantasía válidos en el marco de la clase.

Guía de preguntas

Actividad 2: Experimentos con cinta inferior y cinta superior

En esta actividad, otra vez vas a llevar a cabo observaciones. Todavía no vamos a explicar por qué pasa lo que pasa.

1. Pegá un trozo de cinta adhesiva a tu escritorio o pupitre y marcalo con la letra “i”. Después pegá otro pedazo de la misma longitud justo encima del otro y escribí sobre él la letra “s”. Frotalos bien para asegurarte de que estén bien pegados. Éstas serán tus cintas inferior y superior. Despegá la cinta superior. Acercala a diferentes objetos. ¿Ha adquirido el “efecto ámbar”?
2. Ahora despegá la cinta inferior y acercala a diferentes objetos. ¿Muestra el “efecto ámbar”?
3. Si las dos cintas muestran el efecto ámbar, ¿qué pensás que sucederá si acercás una cinta a la otra? Primero anotá tu predicción, después tratá de demostrarla. ¿Se cumplió tu predicción? ¿Cuál es tu observación?
4. Pegá dos cintas sobre la mesada, una al lado de la otra. Después pegá otras dos cintas sobre las primeras. Ahora tenés dos cintas inferiores y dos cintas superiores. Despegá las dos cintas “s”. Asegurate de que ambas cintas posean la propiedad ámbar. ¿Cómo interactúan?
5. Despegá las dos cintas “i”. Asegurate de que ambas cintas posean la propiedad ámbar. ¿Cómo interactúan?
6. Si estas dos cintas no se comportan como las dos de la actividad anterior, quiere decir que hay algo diferente en estas dos situaciones. Es posible que las dos cintas de esta actividad sean diferentes de las dos de la actividad anterior, o también es posible que una sola de ellas sea diferente. Comprobá qué pasa con las cintas “i” y “s” al acercarlas a cintas simples (sin otra cinta encima). ¿Qué resultados obtuviste? ¿La cinta simple se comporta como una cinta “s”, como una cinta “i” o como ninguna de las dos?
7. ¿Podés encontrar una forma de obtener una cinta que se comporte de manera diferente de “i” o “s”? Probá pegando la cinta sobre diferentes superficies. ¿Cuántos tipos de cintas encontraste en tus exploraciones? ¿Qué superficies probaste? Si hubiera más tipos de efectos ámbar, ¿cómo los reconocerías?

Comentario de la Actividad 2

Es importante, *antes* de encarar cualquier experimento, que los estudiantes verifiquen que las cintas (tanto la inferior como la superior) tengan poder atractivo; de lo contrario los resultados pueden ser confusos.

La pregunta 3 incita a los estudiantes a realizar predicciones sobre la base de lo que conocen. Pero además prepara el terreno para un resultado inesperado: las cintas se atraen en vez de repelerse. El mismo resultado puede obtenerse si una de las dos cintas perdió el efecto ámbar; por eso es importante comprobar que la propiedad esté presente en ambas cintas.

Al generar otro juego de cintas dobles los estudiantes pueden comprobar que las cintas "s" se repelen mutuamente y que las cintas "i" también. De esto se deduce que cintas tratadas de manera idéntica se repelen, pero que existen por lo menos dos tipos de tratamiento, porque existen casos en los cuales las cintas se atraen fuertemente. Las cintas "sencillas" (aquellas que no tienen otra cinta por encima) se comportan como cintas inferiores. La cinta superior y la cinta sencilla se atraen. La cinta inferior y la cinta sencilla se repelen. No hay ninguna manera de distinguir si una cinta es sencilla o inferior.

Aquí es interesante que el docente introduzca el siguiente desafío: "Yo voy a despegar dos cintas: una inferior y una superior, pero sin que ustedes miren. Si yo les doy entonces esas cintas incógnita, ¿pueden ustedes usar sus propias cintas para decidir cuál es superior y cuál es inferior?". Por supuesto que pueden: la cinta producida por ellos que atraiga a una cinta superior y repele a una cinta inferior es en sí una cinta inferior. Y viceversa. Hay que tener cuidado de que las dos pruebas recíprocas se realicen (es decir, probar tanto con cintas superiores como inferiores –la razón quedará clara al analizar la próxima pregunta–) y verificar que ninguna de las cintas en uso haya perdido su carga.

La pregunta 7 apunta a un experimento clave en la indagación. El docente debe subrayar que han encontrado dos tipos de cintas pero que pueden existir infinidad de otros tipos. Una cinta fue despegada de la mesa mientras que la otra fue despegada de otra cinta. ¿Será posible que distintas superficies generen distintos comportamientos? ¿Cómo se comportaría un tercer tipo de cinta? En principio podría atraer cintas de tipo "s" y de tipo "i". Toda cinta que atraiga a "s" e "i" pero repela a este nuevo tipo deberá ser clasificada como "tercera opción". Otra posibilidad sería un tipo de cinta que repela a ambas cintas. Nunca se han encontrado efectos de este tipo, y por eso creemos en la existencia de sólo dos tipos de carga.

Muchos estudiantes creen que hay algo mágico acerca del número dos. Hablamos muchas veces de “cargas opuestas”. No hay nada de “opuesto” en los distintos tipos de carga; simplemente son distintas cargas, en cuanto pueden ser distinguidas en experimentos como los que acabamos de discutir.

Esta actividad es un magnífico ejemplo de cómo opera la ciencia: cierta evidencia apunta a la existencia de más de un tipo de cinta. Se comprueba con facilidad que hay dos tipos, pero no puede excluirse que existan otros. Concluir que sólo hay dos requiere infinidad de experimentos. ¿Cómo podemos estar seguros de que el día de mañana no encontraremos un tercer tipo de cinta que nadie encontró hasta ahora? En verdad, no podemos estar absolutamente seguros, pero cientos de años de búsqueda por parte de miles de científicos, curiosos, aficionados y estudiantes no han logrado encontrarla. Podemos decir entonces que estamos seguros, más allá de toda duda razonable, de que no hay un tercer tipo de cinta. Para la ciencia, no sólo es importante lo que encontramos, sino también lo que *no* encontramos (aunque podamos imaginarlo, así como en este caso imaginamos un tercer tipo cinta).

ACTIVIDAD 3: SÍNTESIS GRUPAL

La Actividad 3 busca generar un consenso en la clase acerca de los fenómenos observados. Los estudiantes completan sus guías en forma personal, pero discuten sus resultados primero con sus compañeros de equipo y más tarde con toda la clase. Las discusiones generales permiten al docente enfocar las ideas y aportar datos históricos o dirimir disidencias sobre lo observado. Es posible que algunos experimentos deban repetirse a fin de alcanzar consensos.

Guía de preguntas

Actividad 3: Discusión sobre las observaciones

Para esta actividad primero trabajarás con tu grupo para después participar en una discusión de toda la clase sobre el tema.

1. Como consigna grupal, confeccionen una lista de todas las observaciones que vos y tus compañeros realizaron sobre las cintas adhesivas y sus poderes de atracción y repulsión. Es decir, hagan un resumen de las “reglas”que gobiernan estos fenómenos.
2. Una vez que todos los grupos hayan terminado con la consigna 1, la clase tratará de ponerse de acuerdo acerca de las observaciones sobre las cintas y su comportamiento. Tomá nota de cualquier diferencia que surja entre los grupos. Estas diferencias deben ser debatidas y resueltas mediante la discusión, repitiendo experimentos si es necesario.
3. Con el fin de entenderse mejor entre sí, los científicos inventaron términos para referirse a las cosas que experimentaste. ¿Qué es la “fuerza eléctrica”? ¿Por qué eligieron la palabra “eléctrico”? ¿Qué quiere decir? ¿Qué quiere decir “electricidad vítrea” y “electricidad resinosa”?
4. ¿Cuál es la evidencia de que los objetos con carga del mismo tipo se repelen?
5. ¿Cuál es la evidencia de que los objetos con carga distinta se atraen?

Comentario de la Actividad 3

Ésta es la actividad que validará el conocimiento adquirido. Es importante que el docente modere esta discusión. Si dos grupos tienen observaciones diferentes, hay que repetir los experimentos hasta que todos observen lo mismo. (Aquí debe recordarse que un experimento no puede “dar mal”, sino que, si se observan resultados diferentes, habrá que buscar una explicación basada en diferencias metodológicas e intentar resolver tales discrepancias a fin de asegurarse de que los datos hallados son perfectamente replicables por los distintos grupos.) Al final de esta actividad será apropiado introducir los términos técnicos correspondientes. Las “reglas” a las que el docente debe arribar son simples y ya las hemos discutido. El único problema que aparece con frecuencia es el falso descubrimiento de un tercer tipo de carga. Esto sucede cuando una de las cintas que está siendo puesta a prueba ha perdido la carga inadvertidamente. La repetición cuidadosa del experimento (asegurándose de que todas las cintas involucradas atraen objetos “neutros”) resuelve esta cuestión.

Durante esta discusión el docente introducirá los términos técnicos ade-

cuados y contará parte de la historia del concepto de carga, refiriéndose a los experimentos y observaciones de Gilbert y Dufay. Es importante recalcar que los nombres "vítreo" y "resinoso" no reflejan nada en particular: son absolutamente arbitrarios. El vidrio no es la única sustancia que adquiere una carga vítrea, pero había que elegir un nombre y Dufay eligió ése. En realidad, un mismo material puede adquirir un tipo u otro de electricidad dependiendo de contra qué se lo frote. Con los instrumentos que tenemos a nuestro alcance, no es posible determinar si las cintas "i" y "s" son vítreas o resinosas.

Puede aquí también aclararse que "electricidad" es lo mismo que "carga" en este contexto. Una atracción (repulsión) eléctrica es la fuerza de atracción (o repulsión) debida a las cargas.

Las últimas dos preguntas de la actividad, que aluden a la evidencia de dos ubicuas aseveraciones, pueden presentar ciertas dificultades para los estudiantes. Es difícil, sin práctica previa, poner en palabras una serie complicada de razonamientos.

La evidencia de que dos objetos con la misma carga se repelen es que dos cintas tratadas de manera idéntica se repelen. Es más: dos partes de la misma cinta también se repelen. Dufay comprobó también que, si un objeto adquiere su carga por contacto con otro objeto cargado, entonces estos dos objetos se repelen. El hecho de que un objeto haya adquirido su carga por contacto con otro sugiere que tomó parte de esa carga y ésta por lo tanto deberá ser del mismo tipo. Este experimento no está incluido en la presente guía, pero puede ser discutido en el pizarrón.

La evidencia de que dos objetos con carga diferente se atraen es más sutil. La observación primaria es que hay ciertos objetos cargados que se atraen. Como ya hemos establecido que los objetos cargados de manera idéntica se repelen, esto justifica la afirmación de que los objetos cargados que se atraen *deben* tener dos tipos diferentes de carga. Estas dos observaciones tomadas en conjunto permiten ahora definir como cargas idénticas a aquellas que producen repulsión y como cargas diferentes a aquellas que se atraen. Nótese que en ningún caso hablamos de cargas "opuestas".

Es importante discutir estas preguntas en clase. Por un lado, brindan una oportunidad de analizar las evidencias detrás de nuestras aseveraciones, lo cual es un objetivo de todo programa en ciencias. Por otro lado, obligan a los estudiantes a detenerse a pensar qué entendemos por "iguales". El hecho de que cargas "iguales" se repelen suele aseverarse como si fuera un

dogma. No podemos tomar a la repulsión como definición de igualdad; la definición debe provenir de un criterio independiente, las cintas deben ser tratadas de manera idéntica. De lo contrario estaremos razonando en forma circular.

ACTIVIDAD 4: REPASO DE LO APRENDIDO

Esta actividad es un repaso de lo estudiado anteriormente para que los estudiantes revean, por su cuenta y en su casa, las ideas exploradas en clase y tengan la oportunidad de reflexionar sobre ellas. También es importante que intenten hacer explícitas sus ideas y que se vean forzados a explicarlas de manera coherente y completa en forma escrita. Pero esta actividad en casa deberá ser complementada por otra en clase, en la cual la tarea del hogar se discuta y corrija de manera oral y grupal.

Guía de preguntas

Actividad 4: Para contestar en casa

1. Basándote en tus observaciones, escribí una definición, con tus propias palabras, del término “carga”.
2. ¿Qué son “electricidad vítrea” y “electricidad resinosa”? ¿Cómo se comparan con nuestras cintas “s” e “i”?
3. De acuerdo con lo que aprendiste, ¿qué significan las palabras “eléctrico” o “electricidad”?
4. Si existiera un tercer tipo de carga, ¿en qué se diferenciaría de los otros dos tipos? ¿Cómo podrías saber si un objeto está cargado con este tercer tipo de carga? ¿Alguien ha observado este tipo de fenómenos?

Comentario de la Actividad 4

La electricidad vítrea y la resinosa corresponden a las cintas “s” e “i”, pero mediante los experimentos realizados en clase es imposible determi-

nar cuál es cuál. Existe una forma de resolverlo. La electricidad resinosa es por definición aquella que adquiere un trozo de ámbar al ser frotado con pelo de gato. Una barra de acrílico frotada con pelo de gato adquirirá el mismo tipo de carga. Esta barra puede ser entonces comparada con cintas "s" e "i" y así determinar su tipo.

REFLEXIONES FINALES

Es interesante destacar que a lo largo de la secuencia de actividades descriptas hemos usado la mayoría de las prácticas pedagógicas que elaboramos en el capítulo 1.

Nótese, por ejemplo, el cuidado puesto en no introducir terminología antes de tiempo. En las primeras dos actividades los estudiantes se familiarizan con la fenomenología básica de los materiales cargados. Al final de la actividad 2 han sido expuestos a una de las observaciones más importantes de esta historia: que existen dos tipos diferentes de carga. Pero la carga todavía se denomina "efecto ámbar" en la clase. Los alumnos sin duda conocen la palabra carga y la expresión electricidad estática, pero al llamar "efecto ámbar" a los fenómenos que se van observando, el docente pone énfasis en las ideas, desviando la atención de las meras palabras. Después de todo, decir *carga* no nos hace entender estos fenómenos. En ocasiones pensamos que dos objetos frotados se atraen *porque* están cargados, cuando la realidad es la inversa: *decimos* que los objetos están cargados porque se atraen o repelen.

Las presentaciones tradicionales introducen el tema declarando que existen dos tipos de carga. ¿Cuál es la evidencia? Pues bien: en las actividades de este capítulo está la evidencia al alcance de las manos (y la mente) de cualquier estudiante. Como se ve, los experimentos con cinta adhesiva no presentan dificultades técnicas y brindan a los estudiantes la posibilidad de ver por sí mismos la necesidad de invocar dos tipos de cargas para poder explicar todo el rango de observaciones. En ningún caso "vemos" dos tipos de carga; lo que observamos son cintas que se atraen y cintas que se repelen, e inferimos de ello que deben existir dos y sólo dos tipos de carga.

Finalmente, en las discusiones generales se introduce la terminología, cuando ya los estudiantes están más que familiarizados con los fenómenos. Los términos "positivo" y "negativo" no se introducen en esta guía. Su connotación casi matemática tiene ventajas y desventajas, como veremos en el

capítulo 9. En un primer acercamiento al tema de carga consideramos mejor no usarlos.

Recién en la última actividad se solicita a los estudiantes que definan el término “carga”. Nótese la inversión: en la enseñanza tradicional normalmente la definición es dada por un libro o por el docente y antecede a todo el estudio del tema. Aquí se opera al revés: los estudiantes, al estar familiarizados con los fenómenos, generan ellos mismos las definiciones de los términos.

Segunda Parte

El aspecto metodológico de la ciencia

4

GAJES DEL OFICIO

Uno de los aspectos de la ciencia más visiblemente reconocidos es el de su metodología. En efecto, los científicos utilizan una serie de herramientas del pensamiento muy características que, desde nuestra postura pedagógica, deben estar reflejadas en la enseñanza de la ciencia. En otras palabras, si nuestro objetivo es que los estudiantes adquieran en cierta medida las formas de pensar propias de la ciencia, la metodología de la investigación científica resulta un aspecto clave en la enseñanza.

Lo que tradicionalmente se denomina "método científico" supone una serie ordenada de pasos para ir encontrando respuestas consistentes a preguntas bien planteadas relacionadas con lo que sucede en nuestro entorno. En este esquema, una pregunta estará bien planteada si admite ser contestada a través de experimentos u observaciones. Y la respuesta será consistente si otros científicos pueden obtener esa misma respuesta siguiendo los mismos pasos, es decir, si los resultados son reproducibles.

Cuando se describe esta serie de pasos, comúnmente se dice que el trabajo científico comienza con una observación que genera una pregunta, pasa por hipótesis y predicciones, sigue con más observaciones e inferencias, con el diseño y la ejecución de experimentos, la recopilación de datos, el análisis de esos datos obtenidos y culmina con la interpretación y presentación de los resultados. Cada uno de estos pasos, a su vez, supone otros. Por ejemplo, diseñar un experimento implica separar variables, hacer uso de

controles y medir dichas variables. Analizar datos conlleva entender cómo se estiman los errores en la medición. Y presentar los resultados implica construir tablas y gráficos, y usar lenguaje matemático.

Esta visión de la investigación como una actividad secuencial y ordenada tiene sus orígenes, en parte, en la forma en que los científicos presentan sus resultados ante sus pares. Los artículos científicos están escritos según un formato convencional que relata las investigaciones en forma secuencial con el objetivo de comunicar fácilmente a otros investigadores cómo se realizó el trabajo y cuáles fueron los resultados. En sus publicaciones los científicos exponen los antecedentes del tema, los materiales y métodos que utilizaron, los resultados experimentales y, por último, la interpretación y la discusión de esos resultados. Sin embargo, la actividad científica real dista mucho de esta secuencia lógica y lineal de las revistas científicas, y se parece muy poco a esa serie de pasos fijos que se suele enseñar en la escuela como "el método científico".

Si bien usualmente se supone que el proceso de investigación científica comienza con una pregunta planteada de forma deliberada y cuidadosa, esto no necesariamente sucede siempre así. A veces una investigación comienza con experimentos exploratorios que un investigador realiza simplemente "para ver qué pasa", otras veces con observaciones que le llaman la atención, otras como una búsqueda para conciliar ideas divergentes y otras a fin de validar una determinada visión de la realidad. Muchas investigaciones brillantes (como el desarrollo de la penicilina a partir de un hongo que contaminó un cultivo bacteriano) comenzaron a partir de errores que dieron lugar a observaciones inesperadas, o con experimentos que buscaban responder a preguntas diferentes de las que se contestaron finalmente.

Así, en la Francia de la Revolución, Lavoisier, padre de la química, describía con brío su deliberado plan de investigación basado, convencionalmente, en preguntas (citado en Halperin Donghi, 1967, págs. 31-32):

> ¿Existen diferentes tipos de aire? ¿Es suficiente que un cuerpo esté en estado permanente de elasticidad para ser considerado un tipo de aire? ¿Son los distintos tipos de aire que la naturaleza nos ofrece [...] sustancias excepcionales o modificaciones del aire de la atmósfera? Éstas son las principales cuestiones que comprende el plan que me he trazado y cuyo desarrollo me propongo someter a la atención de la Academia.

De manera prácticamente simultánea, en Inglaterra, Joseph Priestley, descubridor del oxígeno, cuenta su tendencia a realizar experimentos con

un ánimo exploratorio, muchas veces sin un objetivo claro (citado en Conant, 1957, pág. 99):

> No puedo recordar, con la distancia del tiempo, qué ideas tenía en mente cuando realicé estos experimentos; pero sé que no tenía expectativas sobre el verdadero punto de estos. [...] un pequeño o evanescente motivo hubiera sido suficiente para inducirme a hacerlos.

A su vez, se cuenta que Michael Faraday, uno de los grandes experimentalistas de todos los tiempos, estaba tan seguro de la veracidad de su idea intuitiva de que un imán debe crear electricidad (por una razón de simetría, ya que una corriente eléctrica crea magnetismo), que llevaba siempre los materiales necesarios en el bolsillo –un imán y un cable de cobre– y experimentaba sin cesar en toda oportunidad posible hasta que, por fin, encontró el efecto que buscaba y formuló la ley de inducción.

Además de comenzar de las más variadas maneras, la investigación procede por múltiples e inesperados caminos. Esto es esperable en una tarea que trata precisamente del descubrimiento de cosas que son desconocidas. Estos caminos variables dependen de la creatividad e idiosincrasia de los investigadores y están plagados de los peligros inherentes a cualquier actividad humana: envidias, prejuicios, inercia para pensar en términos novedosos, enamoramiento de viejas ideas, etc.

En muchas ocasiones, por ejemplo, los científicos encuentran simplemente lo que quieren encontrar. Podemos ilustrar esto con el caso de la medición de una importante constante física, la velocidad de la luz. En la época de Galileo se suponía que la velocidad de propagación de la luz (que llamaremos *c*)[1] era, si no instantánea, por lo menos extraordinariamente rápida. En 1675, usando mediciones astronómicas, se estableció que el valor de *c* era finito y se tardó casi dos siglos en efectuar las primeras mediciones terrestres. En 1880, Albert A. Michelson (1852-1931) hizo el primero de sus numerosos experimentos para determinar *c* usando un método de espejos giratorios. Michelson, inmigrante de Rusia a muy temprana edad, obtuvo el primer Premio Nobel otorgado a un ciudadano de Estados Unidos[2] y se convirtió en un científico

1. Se atribuye el uso de la letra “c” a la palabra latina *celeritas*, es decir, velocidad.

2. No lo obtuvo por las mediciones de la velocidad de la luz sino por su trabajo con Morley, que dio por tierra con la teoría del éter que se suponía necesario para la vibración de las ondas electromagnéticas.

muy reconocido en su época. Los experimentos de Michelson para medir *c* se extienden durante 52 años, y los valores resultantes eran cada vez más bajos. El último resultado, publicado en 1932, da un valor de 299.774 km/seg con un error probable de 11 km/seg. Esta cantidad está por debajo del valor aceptado actualmente para *c*. Lo curioso es que el valor de Michelson de 1932 fue aceptado durante veinte años después de publicado, y hasta fue validado por experimentos de los años 1940 y 1941 hechos por otros investigadores, en Alemania y en los Estados Unidos, usando otro método. ¿Cómo era posible que usando técnicas distintas y trabajando en forma totalmente independiente los tres resultados coincidieran? Se ha sugerido que "un factor psicológico inconsciente hizo que los experimentadores posteriores buscaran errores en su propia técnica hasta poder hacer coincidir sus resultados con los del gran maestro Michelson" (paráfrasis de J. H. Sanders, 1965, p.17). El radar, desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial, proveyó en 1951 la primera evidencia de que el resultado aceptado de *c* era erróneo. Pero esta evidencia, en su momento, pasó inadvertida o ignorada, hasta que fue confirmada con el correr de los años cincuenta por una variedad de métodos nuevos.

Como vemos en estos ejemplos, hay un lado muy humano en el aparentemente frío procedimiento científico: miedos, pasiones, ideas testarudas..., todo forma parte de la investigación. También las formas de investigar son tan variadas como las personalidades de los científicos que las implementan. Sin embargo, dentro de esta diversidad de temperamentos y de formas de proceder existen tácticas y estrategias que todos los investigadores usan como parte de "su método" y que constituyen las herramientas fundamentales para hacer ciencia. Por eso, si queremos que nuestros alumnos aprendan la esencia de este método, debemos enseñarles a usar las herramientas de investigación. James Bryant Conant, quien fuera alguna vez presidente de la Universidad de Harvard, Estados Unidos, lo expresa de la siguiente manera (Conant, 1957, p. vii):

> Incluso un ciudadano altamente educado e inteligente sin la experiencia en investigación fallará casi siempre en entender la esencia de una discusión entre científicos sobre un proyecto de investigación. Esto no se deberá a la falta de conocimiento científico por parte del lego o a su incapacidad de comprender la terminología técnica del científico; se deberá en gran medida a su ignorancia fundamental de qué puede o no puede lograr la ciencia [...]. No tiene una "sensación" de lo que podríamos llamar "las tácticas y estrategias de la ciencia".

Las herramientas de pensamiento del científico no son fácilmente codificables en "recetas" del método científico. Esto queda de manifiesto en el hecho de que los científicos en formación no aprenden el método leyendo libros, ni toman cursos en "metodología de la ciencia". Aprenden ciencia haciendo ciencia.

El problema, entonces, al querer trasladar al aula los aspectos metodológicos de la ciencia es que parecería que sólo quienes han realizado investigación científica por sí mismos, es decir, los científicos, pueden conocer las sutilezas de la metodología. Sin embargo, y sin desconocer los límites del trabajo en el aula, hay algunas prácticas pedagógicas que pueden contribuir a desarrollar este aspecto de la ciencia en la escuela.

EL ASPECTO METODOLÓGICO DE LA CIENCIA EN EL AULA

Para desarrollar herramientas de pensamiento acordes con la forma de conocer de la ciencia es sumamente importante que los estudiantes tengan la oportunidad de involucrarse personalmente en una investigación en la que intenten responder alguna pregunta de las que llamamos "contestables". Es deseable, si se puede, que se trate de una pregunta auténtica, planteada por ellos mismos o cuya respuesta sea significativa para ellos y no que sólo sirva para contentar al profesor respondiendo a una guía de trabajo. Las preguntas pueden ser de tipos diversos; lo esencial en esta recorrida por el "método científico" es el desafío de buscar explicaciones posibles y ponerlas a prueba. Para ello no es imprescindible contar con un laboratorio o equipamiento sofisticado, como ejemplificaremos en el capítulo 6.

Participar de las idas y vueltas (con sus frustraciones y alegrías) de una investigación es fundamental para construir la capacidad de pensar científicamente. La búsqueda de información, el desafío de pensar en explicaciones alternativas cuando los resultados contradicen lo esperado y la presentación y defensa de estos resultados ante pares son experiencias que, de ser solamente leídas o contadas, pierden en gran medida su valor vivencial y su poder educativo.

Otra estrategia útil para enfatizar el aspecto metodológico de la ciencia en el aula es el estudio de casos históricos en los que diferentes personajes resolvieron determinados problemas o respondieron ciertas preguntas. El fragmento de Conant citado más arriba, sin ir más lejos, pertenece a un libro publicado por la Universidad de Harvard en 1957, precisamente con el objeto de estudiar en detalle una serie de casos clave en la historia de la

ciencia que permiten ver claramente cómo se resuelven problemas científicos y con qué vallas internas y externas tropiezan quienes tratan de resolverlos. Este tipo de material puede ayudar a docentes de educación secundaria a tener un conocimiento más cabal de las sutilezas de la investigación, sin necesidad de convertirse en investigadores. Biografías, libros de historia e incluso obras de teatro y películas también pueden contribuir a ilustrar los vaivenes del trabajo científico y constituyen valiosos recursos para recorrer con los estudiantes historias de investigadores y sentirse más cerca de la realidad del trabajo científico. Según Edward O. Wilson (2002), entomólogo y divulgador de la ciencia, el poder de las historias en la enseñanza reside en la capacidad innata de los seres humanos de entender, disfrutar y recordar las narraciones.

A continuación analizaremos algunas de las herramientas utilizadas con mayor frecuencia en la investigación científica (los famosos “pasos” del método científico) y sugeriremos prácticas para que los alumnos se familiaricen con ellas. Si bien en esta explicación seguimos el orden tradicional usado en la publicación de trabajos científicos, es importante tener en cuenta que, como ya hemos explicado, durante el proceso de investigación el orden de los pasos puede (y suele) ser muy distinto.

LAS PREGUNTAS

Como decíamos, detrás de toda buena investigación hay una pregunta de fondo que el investigador quiere responder. Los buenos científicos buscan afanosamente buenas preguntas, aquellas que son interesantes y contestables. En el aula, al igual que en la ciencia profesional, es importante fomentar en los alumnos el arte de hacer preguntas que conduzcan a investigaciones; en este sentido lo importante no es sólo la pregunta sino la forma en que se la plantea. Muchas veces sucede que preguntas muy interesantes están formuladas de tal manera que no conducen a experimentos claros. En ese caso, es necesario reformularlas de modo que podamos abordarlas, sea por experimentación o a través de observaciones. Con frecuencia nos preguntamos por qué sucede algo. Sin embargo, el “porqué” suele ser difícil de resolver: las preguntas que se refieren a mecanismos en vez de a causas (el “cómo” en vez del “porqué”) son muchas veces más sencillas de contestar. No es tarea fácil, pero es importante que el docente guíe a los estudiantes a encontrar preguntas que puedan ser contestadas em-

píricamente, aunque a primera vista suenen menos interesantes. Muchas veces esto implica cambiar un "porqué" por un "cómo". En vez de tratar de develar por qué los circuitos en serie y en paralelo se comportan de manera diferente, podremos tratar de descubrir cómo fluye la corriente en las diferentes partes de cada circuito.

Puede suceder, también, que una pregunta esté mal o imprecisamente formulada, y por ello no pueda ser respondida científicamente. Por ejemplo, cuando preguntamos por qué el tigre tiene rayas, podemos estar queriendo saber qué mecanismos celulares producen las rayas o podemos estar queriendo saber qué beneficio evolutivo conlleva tener rayas. Éstas son dos preguntas diferentes y es fundamental poder diferenciarlas a la hora de buscar formas de responderlas.

Muchas veces los textos y las clases de ciencia transmiten el conocimiento como si éste apareciera por generación espontánea, sin un acto de creación. Es como si, de la nada, sin motivos ni intereses, la verdad se revelara ante los ojos del investigador que la busca. El simple acto de recordar que detrás de los conocimientos generalmente hay preguntas es un primer paso para reconocer que detrás de ellos hay un proceso de búsqueda, de hipótesis fallidas y exitosas, de experimentos vanos y fructíferos, de resultados negativos y positivos.

El hacerse preguntas no es necesariamente una actividad espontánea sino una habilidad que debe desarrollarse y ser usada en forma deliberada. Los estudiantes deben salir a la "caza de preguntas" como primer paso para aprender a pensar científicamente.[3]

Por último, así como una pregunta genera un proceso de exploración que conlleva observaciones y experimentos, el proceso de exploración genera, a su vez, otras preguntas. De esta forma las preguntas se suceden unas a otras, pues el encontrar una respuesta genera varias preguntas nuevas.

LAS HIPÓTESIS

Apenas surge una pregunta, un científico imagina una o más respuestas o hipótesis posibles, que deberá luego someter a prueba. Las hipótesis pueden referirse a ideas acotadas e inmediatas ("Creo que el ratón murió de hambre") o de mayor aplicabilidad y grado de abstracción ("Creo que

3. Este tema se desarrolla en forma más extensa en el capítulo 5.

la materia está constituida por partículas cargadas”). Una hipótesis no es una adivinanza descabellada, sino una suposición basada en la experiencia previa, los datos disponibles y el sentido común. En el aula, proponer hipótesis es un ejercicio importante, pero debe ser usado con mesura para no terminar negando el aspecto empírico de la ciencia. Cuando los estudiantes proponen hipótesis tras hipótesis, da la impresión de que lo importante es imaginar el mejor escenario posible para una situación, y quien produzca la hipótesis aparentemente más creíble habrá dado en el clavo. Es esencial recordar a los alumnos que toda hipótesis, por buena que parezca, debe ser validada mediante la observación y la experimentación. Las mejores hipótesis no son las más ingeniosas ni las que excitan fuertemente nuestro sentido común, sino aquellas que se pueden poner a prueba empíricamente.

Una hipótesis, por lo tanto, debe permitir realizar predicciones que puedan comprobarse mediante observaciones o experimentos. He aquí un ejemplo. En clase alguien pregunta: “¿Qué pasaría si pongo esta planta en ese armario?”, y plantea una posible respuesta: “Las plantas necesitan la luz del sol para fotosintetizar. Basado en esta hipótesis, predigo que la planta se va a morir porque ese armario no tiene ni sol ni luz”. Tras una semana se abre el armario y los alumnos se encuentran con una planta etiolada: amarillenta pero más crecida que la planta control que habían dejado a la luz. Sorpresa en el aula: hay que proceder a refinar la hipótesis.

En conclusión, proponemos fomentar en los alumnos el hábito de formular hipótesis basándose en preguntas del tipo “¿Qué pasaría si…?” (es decir, qué pasaría si cambio esto o aquello en el fenómeno observado). Si hay una hipótesis propuesta como en el ejemplo anterior (que dice que las plantas necesitan sol para fotosintetizar), la pregunta puede contestarse mediante una predicción basada en ella. A falta de predicciones basadas en explicaciones causales, el docente puede admitir la mejor conjetura que se pueda proponer con la información disponible. Esto último es lo que en la lengua inglesa se conoce como *educated guess*, y que puede traducirse como “conjetura educada” o “especulación fundamentada”. Esta especulación, si bien tiene un carácter audaz, debe considerar los datos relevantes y obedecer al principio de parsimonia, es decir, ser la idea más sencilla posible que nos permite explicar los datos disponibles. Lo que no debe admitirse son las adivinaciones sin fundamento.

LAS OBSERVACIONES

Para corroborar o refutar una hipótesis generalmente es necesario realizar observaciones o experimentos. Para fomentar el hábito de hacer observaciones es útil exponer a los estudiantes a los fenómenos que deseamos analizar y darles la libertad, en la medida de lo posible, para estudiarlos de acuerdo con sus tiempos y su curiosidad, no con los nuestros. Parte del problema con esta forma de proceder es que, según nuestra experiencia, si pedimos a los alumnos que "observen", simplemente mirarán, echarán un vistazo, una ojeada. Para evitar este abordaje superficial, podemos guiar la observación de diferentes maneras. Si queremos que observen algo en particular, por lo general lo más honesto es simplemente llamar la atención sobre lo que nosotros mismos observamos.[4] En biología, pedir a los estudiantes que produzcan un dibujo de lo que ven ayuda mucho a forzar una observación detenida. Con esta misma lógica, si requerimos descripciones verbales detalladas de lo que ven o de lo que sucede, los alumnos tomarán conciencia de un mayor número de detalles.

Es importante que expliquemos a los alumnos la diferencia entre observación e inferencia o interpretación. Es común, por ejemplo, que al observar un vaso de soda un alumno describa que "se está escapando el aire". En rigor, lo que el estudiante está observando son burbujas que suben dentro del líquido. Decir que es aire conlleva una doble inferencia: asume que las burbujas son un gas y que ese gas es aire. Habría que atrapar las burbujas en un globo o bajo una columna de agua para tener un gas que se pueda someter a pruebas que lo identifiquen por sus características. Distinguir entre observaciones e inferencias es una práctica fundamental al explorar un fenómeno o interpretar los resultados de un experimento. La inferencia no es pura observación sino que implica una hipótesis tácita. De hecho, en una inferencia se realiza un salto lógico desde una observación a una idea no observada. Ciertos conocimientos previos sirven de puente y validan este salto.

4. En los museos participativos que siguen las excelentes normas pedagógicas del Exploratorium en San Francisco, Estados Unidos, el módulo interactivo invita al visitante a observar las características del fenómeno exhibido en carteles-consigna que dicen: "Fijate en que…". De esta forma, el diseñador del módulo guía al visitante hacia la observación de interés (véase <www.exploratorium.edu>).

El arte de observar también puede llevar al planteo de buenas preguntas. Muchos investigadores fueron exitosos gracias a mantener los ojos abiertos constantemente a la búsqueda de cosas interesantes. Los buenos observadores son cazadores de patrones y regularidades: encuentran cosas que se repiten, que se ordenan de manera predecible, que ostentan simetrías, y se preguntan cómo explicar esas regularidades. Por ejemplo, prestan atención a los movimientos periódicos de un péndulo o de los astros en el cielo, o se preguntan: "¿Por qué esos árboles crecen cerca del río?". También buscan situaciones que rompan con ese orden o simetría: "¿Por qué esos árboles crecen sólo en la margen derecha del río?", o "¿Por qué a altas presiones los gases no se comportan como lo hacen a bajas presiones?". Los patrones en la naturaleza y aquellos sucesos que salen de lo habitual han despertado la curiosidad de las personas desde siempre y han incitado a la búsqueda de explicaciones. Para algunos investigadores, esa búsqueda de patrones o regularidades –y, en consecuencia, también la falta de los mismos– constituye ni más ni menos que el objeto último de la ciencia (Bateson, 1990). Estas observaciones pueden surgir de la contemplación de la naturaleza y sus fenómenos o pueden ser el registro deliberado de los resultados de un experimento.

LOS EXPERIMENTOS

Los experimentos, al igual que las observaciones, también pueden generar preguntas. Normalmente, un experimento busca resolver una cuestión, dar una respuesta a una pregunta, poner a prueba una idea. En cualquier caso se habrá de formular una hipótesis y los estudiantes deberán saber claramente cuál es el objetivo del experimento y cómo se logrará. El experimento deberá tener un resultado si la hipótesis se confirma y otro resultado distinto en caso contrario. Si el resultado esperado es el mismo, sea la hipótesis cierta o falsa, entonces el experimento es inútil –o bien la hipótesis ha sido mal formulada–.

Además, es importante constatar si un determinado resultado confirma nuestra hipótesis o si ese mismo resultado podría ser compatible con otras hipótesis alternativas. ¿Nos sirve este resultado para descartar una idea, la comprueba o sólo le presta un sustento parcial? Cuando realizamos experimentos en clase, muchas veces estas cuestiones quedan implícitas, y asumimos que los estudiantes están siguiendo la misma lógica que nosotros,

que hemos diseñado la experiencia o la conocemos de antemano. Por eso, es imprescindible ejercitar con los alumnos la capacidad de predecir resultados posibles en un experimento y reflexionar sobre qué significado tendría cada uno de esos resultados para que el experimento tenga sentido.

Al hacer una experiencia en clase, también debemos tener en cuenta cuáles son las posibles fuentes de variación y de error. ¿Será posible que el resultado que obtengamos se deba a factores externos al experimento? Existen varias técnicas para asegurarnos de que los resultados se deben realmente a lo que creemos que se deben. Estas técnicas incluyen el control de variables y los controles experimentales. No nos detendremos en el tema del diseño experimental ya que podría ocupar un volumen por sí mismo, pero es sin duda un tema fundamental que debe ser incorporado de una manera u otra dentro de la clase de ciencias. En el capítulo 6 proponemos experiencias concretas para ilustrar este tema.

Por último, hacer experimentos implica realizar mediciones. Es importante establecer que toda medición acarrea consigo errores. Por más precisa y cuidadosa que sea, no existe la medición exacta. Así, cuando decimos que una mesa mide 3,40 m ± 0,01 m, lo que estamos diciendo es que, si la medimos otra vez, hay una probabilidad del 50% de que la nueva medida esté entre 3,39 m y 3,41 m. Los errores de este tipo, llamados errores probables o estadísticos, no significan equivocaciones sino que establecen los límites dentro de los cuales se conoce la cantidad medida. El buen experimentador es aquel que sabe estimar sus errores probables. Con frecuencia los estudiantes ofrecen respuestas a problemas cuantitativos con una serie descabellada de cifras significativas. Es bueno recordarles que un resultado de este tipo es absurdo si los instrumentos de medición o los datos originales no tienen el mismo grado de precisión. Por ejemplo, es absurdo decir que uno midió el pupitre con una regla y obtuvo un largo de 1,52378956 metros, ya que las reglas habitualmente tienen una graduación mínima de 1 milímetro, de modo que aun interpolando, el resultado de la medición no puede tener más de cuatro dígitos decimales.

LOS RESULTADOS

Después de realizar un experimento viene el análisis de sus resultados. Ésta es una actividad exclusivamente mental. De hecho, no es necesario que uno mismo realice el experimento para poder analizar sus

resultados. Una de las capacidades (y a veces uno de los deleites) de los científicos es poder criticar los resultados de otros, o incluso interpretar su significado. Francis Crick (uno de los descubridores de la estructura molecular del ADN) y Robert Oppenheimer (director del equipo de científicos que desarrollaron la bomba atómica en Estados Unidos) eran conocidos por su capacidad de interpretación de resultados ajenos. Esto quiere decir que no es necesario hacer experimentos todo el tiempo para desarrollar las habilidades críticas de un científico. Siempre que podamos, será enriquecedor presentar los datos que surgen de un experimento que otros han realizado y tratar de entender qué nos están diciendo estos resultados. ¿Podemos rechazar la hipótesis? ¿Son los datos significativos desde el punto de vista estadístico? También es posible analizar "experimentos mentales" (en inglés llamados *thought experiments*), que han cumplido un papel central en la ciencia desde sus inicios. Un ejemplo clásico es el de Galileo, quien imaginó qué sucedería si una bola rodara sobre una superficie infinitamente pulida, es decir, sin fricción. Su discusión se basa en un experimento imposible de hacer, pero útil de imaginar para desarrollar la idea de inercia.[5]

Los científicos expresan muchos de sus resultados en el lenguaje de la matemática. Este lenguaje es fundamental y caracteriza en gran medida la forma en que la ciencia conceptualiza y genera sus ideas. No se trata simplemente de cálculos de valores numéricos como los que los ingenieros deben realizar para predecir con precisión, por ejemplo, la altura que debe tener un puente. Muchas de las ideas principales que la ciencia ha producido fueron posibles sólo por el estudio cuantitativo de los fenómenos involucrados. La ley de la gravitación universal de Newton, que dice que todos los cuerpos materiales se atraen mutuamente, se deriva en parte de las leyes de Kepler, que son análisis cuantitativos de las órbitas de los planetas. La teoría atómica tiene su evidencia seminal en la ley de proporciones definidas de Proust. Las leyes de conservación (de cantidad de movimiento, energía, masa, carga, momento angular) son esencialmente cuantitativas y nos han dado una visión profunda y útil de la manera en que funciona el universo. Por ello consideramos importante desarrollar en las clases de ciencia casos concretos, como estos que acabamos de mencionar,

5. El ejemplo del experimento mental de Galileo será analizado en detalle en el capítulo 15.

en los que las mediciones cuantitativas han tenido impacto en la forma en que entendemos la naturaleza.

Sin embargo, a pesar del carácter cuantitativo de muchas investigaciones, todo científico recurre a la solución cualitativa de problemas antes de embarcarse en largos cálculos. Es decir, trabaja con órdenes de magnitud para tener una idea aproximada de los resultados, usa esquemas gráficos, tantea soluciones y resultados posibles, plantea tendencias, pregunta qué sucedería en casos límite, busca comparaciones con problemas semejantes. Es muy útil exponer a los alumnos a este proceder para que no adquieran el hábito de resolver problemas probando cuál de las fórmulas que ya conocen pueden aplicar. Es importante que puedan pensar en términos de órdenes de magnitud (¿la densidad del sólido es diez, mil o cien mil veces mayor que la del gas?), entender la dirección de los cálculos (¿la velocidad va a aumentar o a disminuir?, ¿la aceleración va a ser positiva o negativa?) y manejarse con gráficos (¿qué forma tendrá la curva de oscilación del péndulo?).[6]

Se ha dicho que "los científicos son exploradores en un universo de observables, buscadores de patrones y significados", o, en la versión de Niels Bohr (uno de los padres de la física cuántica e importante pensador del siglo XX), que "la labor científica consiste en extender el rango de nuestra experiencia y reducirla a una forma ordenada" (citado en Holton y Roller, 1958, p. 214). En este sentido, si el aspecto empírico de la ciencia consiste en "explorar un universo de observables" y en "extender el rango de nuestra experiencia", entonces el aspecto metodológico, tal como lo presentamos en este capítulo, nos da las herramientas para llevar a cabo esa exploración y extensión en forma disciplinada. La labor de buscar significados y de reducir nuestra experiencia a una forma ordenada es lo que llamamos el *aspecto abstracto* de la labor científica. El orden y los significados están dados por las leyes, los modelos y las teorías. De eso, justamente, hablaremos en el capítulo 7.

A continuación recapitulamos las prácticas pedagógicas sugeridas en este capítulo.

6. En el capítulo 8 mostraremos cómo se pueden resolver problemas astronómicos simples en forma cualitativa.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO METODOLÓGICO DE LA CIENCIA

- Analizar casos históricos de desarrollo de preguntas, hipótesis, experimentos y análisis de resultados.
- Entrenar a los estudiantes en el arte de formular preguntas deliberadamente.
- Fomentar en los estudiantes el hábito de preguntar "cómo" antes de "por qué".
- Desarrollar el hábito de preguntarse "¿Qué pasaría si…?" (es decir, qué pasaría si cambio variables en el fenómeno observado). A falta de predicciones basadas en explicaciones causales se pueden admitir "conjeturas educadas" pero no adivinanzas descabelladas.
- Incentivar en los estudiantes el hábito de formular hipótesis frente a cualquier pregunta.
- Promover en los estudiantes la costumbre de hacer predicciones basadas en la hipótesis formulada.
- Fomentar en los estudiantes la capacidad de observación y descripción de lo que miran.
- Enseñar a distinguir entre observación, inferencia e interpretación.
- Estimular el diseño de experimentos que puedan contestar las preguntas o contrastar las hipótesis propuestas.
- Involucrar a los alumnos en experimentos en los que tengan que realizar mediciones para interpretar la validez o no de una hipótesis propuesta.
- Estimular en los alumnos la exploración de diversos tipos de metodologías alternativas o complementarias para la resolución de los experimentos.
- Cuando sea posible, resolver problemas en forma cualitativa antes de embarcarse en cálculos matemáticos.

A continuación, en el capítulo 5 se presentará una serie de ejemplos que abordan algunas de las prácticas mencionadas, involucrando a los alumnos en una "cacería" de preguntas, en la recreación de los experimentos controlados que Francesco Redi realizó para refutar la teoría de la generación espontánea, en la elección de sistemas experimentales para la determinación del origen del crecimiento de las plantas y, finalmente, en el desafío de reconstruir una fórmula desconocida a partir del aislamiento de variables.

En el capítulo 6 ejemplificaremos el diseño y la interpretación de experimentos fuera del laboratorio (es decir, cuando los alumnos no efectúan observaciones ni mediciones) mediante ejemplos históricos relacionados con los experimentos de Lavoisier en torno a la ley de conservación de la materia.

5

POPURRÍ METODOLÓGICO: PREGUNTAS, SISTEMAS, CONTROLES Y VARIABLES

Una buena forma de familiarizarse con el método científico es a través del estudio de ejemplos e historias que ilustren tácticas específicas para resolver problemas concretos relacionados con la investigación del mundo natural, así como mediante actividades que enseñen uno u otro perfil del aspecto metodológico de la ciencia. El objeto de este capítulo es presentar varios ejemplos de dichas actividades, tal como pueden darse en el aula, el laboratorio o una salida de campo. Cada una ilustra una o varias de las prácticas esbozadas en el capítulo 4.

EJEMPLO 1: A LA CAZA Y EL ESTUDIO DE PREGUNTAS

Preguntas contestables empíricamente

Con frecuencia nos concentramos en los descubrimientos científicos por su importancia, impacto o ingenio, y sólo estudiamos el conocimiento final que se obtuvo a través de ellos. Olvidamos así que la mayor parte de los descubrimientos científicos no suceden casualmente, como quien descubre un caracol hermoso o un insecto de colores brillantes. Los descubrimientos científicos son el resultado de una búsqueda deli-

berada, que normalmente se formula como respuesta a una o más preguntas. Para que los estudiantes de ciencia comprendan este proceso, es importante que aprecien en cada caso cuáles son las preguntas que los científicos se están haciendo, por qué las formulan, en qué contexto histórico surgen y de qué manera son relevantes para el conocimiento en general. Pero, además, deben aprender que muchas veces las preguntas mismas tienen que ser buscadas y refinadas con enorme esfuerzo. El ejercicio de buscar preguntas contestables en forma empírica es una parte fundamental del aspecto metodológico de la ciencia y debe convertirse en un hábito de cada clase de ciencias, tanto para los docentes como para los alumnos. A fin de fomentar este hábito, los autores hemos usado con frecuencia una actividad que denominamos "cacería de preguntas".

Una de las formas de llevar a cabo esta actividad es en una salida de campo. En una charla introductoria el docente destaca que las preguntas formuladas por un científico no aparecen en su mente de forma espontánea sino que el investigador debe buscarlas de manera activa. Este esfuerzo es parecido a la búsqueda de material biológico (por ejemplo, insectos): para encontrarlo, hay que mirar en los lugares menos evidentes, dar vuelta troncos y piedras. Seguidamente, el docente divide a los alumnos en grupos y le pide a cada uno que busque tres organismos u objetos que llamen su atención (curiosos, bellos, horribles, etc.). Cuando regresan con sus hallazgos, cada grupo debe formular una o más preguntas acerca de cada uno de esos objetos, imaginar una respuesta hipotética y un posible plan de acción para encontrar la respuesta empíricamente.

El docente, claro está, debe conocer el lugar donde se realiza la cacería y saber de antemano qué preguntas interesantes pueden aparecer. En uno de los ejemplos más ricos de esta actividad llevamos a los estudiantes a una orilla rocosa en bajamar. Algunas de las preguntas encontradas fueron las siguientes: ¿Por qué encontramos mejillones sólo en una parte de la roca? ¿Son devorados, nunca llegan al otro lado, se secan, les gusta estar juntos? ¿Se pueden mover los mejillones o están agarrados a la misma roca de por vida? ¿Cómo llegan allí? ¿Qué comen los mejillones? ¿Cómo obtienen su comida? ¿Qué comen los cangrejos? Los cangrejos de diferentes tamaños, ¿tienen diferentes edades? ¿Hay cangrejos machos y cangrejos hembras? ¿Cuántos tipos

diferentes de alga existen? ¿Cómo se forman las olas? ¿Por qué el mar es salado? ¿Por qué las anémonas tienen tentáculos verdes?

Sobre la base de este material el docente puede tomar diversos caminos. Uno es elegir algunas de las preguntas que a su criterio sean contestables con simples experimentos (por ejemplo, hacer la disección de un cangrejo y ver qué tiene en su aparato digestivo, u observarlos durante mucho tiempo y ver qué comen). Otro camino es reflexionar sobre la naturaleza misma de las preguntas. Observar que muchas preguntas no son contestables, otras sólo son contestables con mucho trabajo, y finalmente otras deben ser reformuladas antes de poder ser contestables. Con grupos de corta edad, es deseable identificar dos grandes tipos de preguntas (que son relevantes para entender la función de las preguntas en la investigación científica):

- Preguntas que están relacionadas con creencias o posturas (¿la vida tiene algún significado?, ¿las personas deben ser iguales ante la ley?).
- Preguntas contestables a partir de la indagación (¿qué hace que las hojas se caigan en otoño?, ¿por qué nos enfermamos cuando hace frío?, ¿cómo hacen los animales para comunicarse?).

La relevancia o el interés de una pregunta depende de la época y el contexto en la que es formulada. Cuando las cosas ya fueron “descubiertas” parece evidente que siempre han sido así, como el hecho de que la Tierra gira alrededor del Sol. Por otro lado, hay preguntas que no son imaginables en ciertos momentos: ¿qué sentido tiene hablar de la estructura del átomo antes de tener evidencia de que los átomos pueden ser desarmados en partes?

Las preguntas cambian a través del tiempo

Luego de la cacería de preguntas, se puede realizar otro ejercicio a fin de explorar la relevancia de una pregunta en función del tiempo, utilizando el siguiente cuestionario:

¿Cuáles son las grandes preguntas de nuestros tiempos? ¿Cuáles eran las grandes preguntas hace cien años? ¿Y hace quinientos años? ¿En todas partes del mundo se discute lo mismo?

a) Agrupá las 11 preguntas que siguen en tres categorías, de acuerdo con la época en que pensás que se formularon: hace 500-100 años; hace 100-40 años; en la actualidad:

1. ¿Se puede fabricar una computadora que tenga sentimientos?
2. ¿Está habitada la Luna?
3. ¿Qué produce el sarampión?
4. ¿Cuál es la cura del cáncer?
5. ¿Por qué los objetos caen al suelo?
6. ¿Qué forma tiene la Tierra?
7. ¿Es posible producir oro mezclando distintas sustancias?
8. ¿Hay vida en otros planetas?
9. ¿Un clon humano tendrá la misma personalidad que el individuo original?
10. ¿Se puede construir un aparato para volar?
11. ¿Qué edad tiene la Tierra?

b) ¿Por qué será que las preguntas varían a lo largo de la historia?

Este ejercicio pondrá de relieve que algunas preguntas formuladas en otros tiempos actualmente pueden parecen “tontas” porque ya han sido respondidas. El docente puede guiar una reflexión conjunta acerca de cómo fueron cambiando las preguntas importantes en cada momento histórico y qué papel tuvo la ciencia en ese cambio.

Preguntas propias y preguntas ajenas

La actividad propuesta de cacería de preguntas y la discusión acerca de las preguntas mismas –y no de sus posibles respuestas– puede parecer a simple vista alejada o desconectada de una lección sobre el método científico. Sin embargo, la función de las preguntas es esencial para el quehacer del investigador. En el aula, el docente debe cultivar en sus alumnos el buen

hábito de hacerse preguntas sobre la realidad. Además, frente a cualquier descubrimiento o avance científico, debe habituarlos a inquirir: ¿cuál es la pregunta que estos investigadores están queriendo contestar?

EJEMPLO 2: EL USO DE UN SISTEMA EXPERIMENTAL

En una salida de campo como la esbozada más arriba, puede surgir una serie de preguntas interesantes acerca de las plantas que encontramos. Por ejemplo: ¿Por qué hay plantas más grandes que otras? ¿Por qué los árboles tienen troncos y el pasto no? ¿Por qué algunas plantas no crecen en invierno? ¿Por qué hay variedad de plantas con formas diferentes: por qué el álamo es flaquito y derecho mientras que el pino parece tener forma de cono?

Los "porqué", si bien fascinantes, son preguntas difíciles de contestar. ¿Qué queremos decir exactamente con el "porqué" de algo? Es un ejercicio interesante el tratar de reformular estas preguntas de alguna otra manera. En ciencia los porqué aluden generalmente a las causas de un fenómeno. Estas causas se encuentran dentro de un determinado marco explicativo; por ejemplo, en biología (como es el caso del crecimiento de las plantas) identificamos usualmente dos tipos de causas. Por un lado tenemos la causa fisiológica, es decir, qué aspectos del funcionamiento de un ser vivo producen lo que vemos (por ejemplo: este animal tiene piel verde porque sus células acumulan ciertos pigmentos). Por otro lado tenemos las causas evolutivas, es decir, qué adaptaciones u otras circunstancias de la historia de un grupo de seres vivos producen lo que vemos (por ejemplo: este animal tiene piel verde porque eso le confiere un camuflaje que aumenta sus posibilidades de dejar progenie).

Si bien las causas son investigables, a veces es difícil vislumbrar cómo comenzar. En lugar de los "porqué", es útil considerar los "cómo", es decir, preguntas que apunten a develar mecanismos en vez de causas. Así, en el caso de las plantas, podemos preguntarnos cómo se produce su crecimiento en vez de por qué crecen de tal o cual manera. Si entendemos cómo se produce el crecimiento tal vez podamos, en consecuencia, entender también por qué las plantas crecen de determinada manera. Veamos entonces cómo aprovechar el sistema experimental "planta" para ayudarnos en la formulación de preguntas científicas.

La elección del objeto de estudio

Para poder investigar el modo de crecimiento de las plantas deberemos decidir qué tipo de plantas estudiaremos. No toda planta es ideal. Podríamos, por ejemplo, estudiar los robles, pero crecen con demasiada lentitud y solamente en ciertas estaciones. Típicamente los científicos eligen un "sistema experimental", es decir, un objeto o una situación que representa con simpleza el mundo de fenómenos que les interesan. Se trata de restringir deliberadamente el rango posible de experimentos a realizar, y de reducir el número de variables a un mínimo manipulable. Por ejemplo, Galileo estudió la aceleración de la gravedad en planos inclinados porque le proveían aceleraciones más bajas que él podía medir. En el caso de las investigaciones biomédicas generalmente se usan ratones cuando lo que interesa es investigar casos de humanos. En nuestro caso usaremos plantas sencillas de crecimiento veloz, como las arvejas. No usaremos la planta ya crecida como se la puede encontrar en una maceta o en el campo, sino la plantita recién salida de la semilla porque es de fácil manipulación y porque crece mucho más rápidamente que una planta más vieja. Además, las plantas recién germinadas tienen, en general, una estructura sencilla: una raíz principal y un tallo principal, de modo que evitamos los vericuetos y posibles efectos secundarios de una estructura más compleja, como una rama con numerosas hojas, flores, etc. La idea es que las conclusiones a las que arribemos sean extensibles a otras etapas de crecimiento y a otras especies vegetales.

Las plantas crecen y se ramifican; si observamos la plantita recién germinada veremos que tiene una raíz y un tallo, los cuales crecen por un tiempo antes de ramificarse. La ramificación es un proceso muy interesante, pero, si queremos avanzar en nuestro estudio, deberemos concentrarnos en una cosa por vez. Dejaremos la ramificación para otro momento y pondremos nuestra atención en el crecimiento en longitud, concentrándonos en el crecimiento de la raíz.

Estrategia experimental

Una buena forma de encarar este estudio es plantearles a los alumnos lo siguiente: "Supongamos que queremos saber cómo crece un bebé; específicamente, el antebrazo del bebé. ¿Crece por igual a lo largo de toda su ex-

tensión? ¿Qué experimento podríamos diseñar para comprobar cómo crece el antebrazo?".

Ésta es una cuestión a explorar con los estudiantes. El experimento revelador que proponemos aquí consiste en hacer marcas equidistantes a lo largo del brazo del bebé y observar qué sucede cuando éste crece. Un incremento en la distancia entre marcas indicará crecimiento en esa zona. Los alumnos pueden formular predicciones sobre cómo es el crecimiento: ¿Aumentará la distancia entre las marcas por igual a medida que crezca el brazo? ¿O aumentará más en la muñeca o en el codo que en la parte del centro del antebrazo?

Llevando esta técnica a la investigación del crecimiento en longitud de la raíz de una planta, las dos predicciones que se presentan son: 1) que toda la raíz crecerá en forma pareja; 2) que crecerá en forma despareja, por ejemplo, que sólo crecerá en la punta.

A continuación, indicamos cómo hacer un experimento sencillo con raíces de arvejas para discriminar entre las dos predicciones.

Experimento A

Preparativos. Hacer crecer semillas de arvejas en papel húmedo contra la pared de un frasco de vidrio. Tardan unos cinco días en desarrollar una raíz suficiente (de unos 3 cm) como para hacer el experimento.

Procedimientos. Cubrir un portaobjetos con papel y, para que quede derecha, colocar la plantita sobre el portaobjetos sujetándola con una goma elástica. Con tinta china o un marcador indeleble de punta muy delgada marcar intervalos iguales (espaciados por 1 mm) a lo largo de la raíz, comenzando por la punta (un puntito de tinta es suficiente).

Sumergir el extremo del portaobjetos en un recipiente con agua. La raíz estará húmeda por el contacto con el papel, pero debe quedar fuera del agua para que no se pudra (véase figura 5.1). Cubrir el recipiente para evitar que haya demasiada evaporación. Cada grupo de tres o cuatro estudiantes colocará dos o tres raíces.

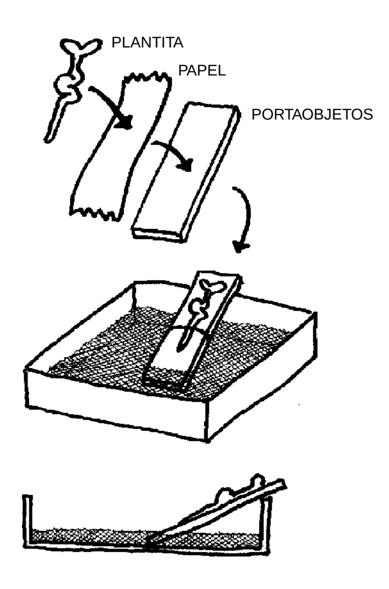


Figura 5.1. Procedimiento para el experimento A

Predicciones. El docente pide a los alumnos que realicen predicciones: “Hagan dibujos de lo que esperan encontrar después de una semana”.

Resultados. Los resultados típicos que se obtienen se muestran en la figura 5.2: la separación mayor entre los puntos en el extremo de la raíz indica que la raíz crece a partir de la punta.

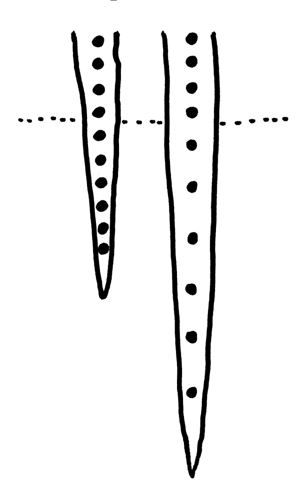


Figura 5.2. Resultados del experimento A

Experimento B

A partir de la identificación de la punta como origen del crecimiento hay un experimento interesante que salta a la vista. ¿Qué sucederá si cortamos la punta de la raíz?

Procedimiento y predicciones. Usando la misma técnica que en el experimento A, se preparan plantitas de arvejas. El objetivo es comparar el crecimiento de una raíz intacta con el de otra con la punta cortada. Cada grupo de estudiantes usa tres cubreobjetos: en uno se coloca una raíz intacta, en los otros dos se colocan raíces con las puntas cortadas. Nuevamente se marcan las raíces con puntitos uniformemente espaciados. Se les pide a los alumnos que hagan predicciones, acompañadas de dibujos, sobre lo que esperan observar una semana más tarde.

Resultados. Al cabo de una semana se comparan las raíces. El resultado será como se muestra en la figura 5.3; o sea, en las raíces con la punta cortada el crecimiento se detiene.

Lo sorprendente de este resultado es que sólo hace falta cortar una pequeña porción de la zona de crecimiento para lograr detener todo el crecimiento de la pequeña raíz. En otras palabras, hay toda una zona que en condiciones normales crece (como queda en evidencia por el alejamiento de los puntitos de tinta china) pero que en ausencia de la primera parte de la punta deja de crecer.

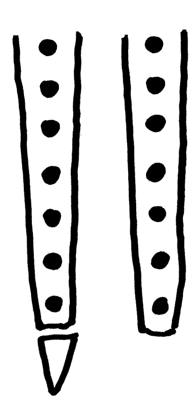


Figura 5.3. Resultado del experimento B

Discusión

Los experimentos realizados muestran que la punta de la raíz es necesaria para el crecimiento de una zona inmediatamente adyacente. ¿Por qué es necesaria? Podemos hipotetizar que la punta produce una señal que le indica a las regiones vecinas de la raíz que deben crecer. O sea, que los tejidos de la punta de la raíz producen una sustancia que se transporta a otros tejidos vecinos, donde provoca un efecto muy específico. Estas sustancias reciben el nombre de hormonas.

Darwin y su hijo, en 1881, realizaron experimentos similares a los nuestros, pero sobre el crecimiento de los tallos de una planta hacia la luz, lo que se denomina fototropismo. Estos experimentos fueron los que desembocaron, en manos de otros investigadores, en el descubrimiento de las hormonas vegetales. Las primeras hormonas de crecimiento de las plantas se identificaron y aislaron en 1926, y se llamaron “auxinas”.

El sistema experimental

El sistema experimental que hemos elegido, la arveja recién germinada, permite investigar toda una gama de problemas. Se trata de un sistema simple, fácil de usar y versátil para contestar muchas preguntas. Así como determinamos el lugar de crecimiento de la raíz, también se pueden hacer experimentos con el tallo, usando la misma técnica de marcar intervalos. Una pregunta interesante y simple de contestar experimentalmente es dónde tiene su origen el crecimiento del tallo. Y, también, cuál es el rol de los cotiledones (los embriones de las hojas) en el crecimiento del tallo. ¿Qué sucede en el desarrollo del tallo si cortamos los cotiledones?

Otra pregunta interesante y sencilla de contestar con el mismo sistema experimental remite al fototropismo. Usando la técnica de marcar intervalos uniformes en el lado del tallo que hace frente a la fuente de luz y también en el lado opuesto, se ve claramente el crecimiento asimétrico del tallo: crece más rápidamente del lado contrario al que ilumina la fuente de luz, de modo que el efecto final es un tallo que se curva hacia la luz.

La elección de un sistema apropiado es de suma importancia en la investigación científica. Bien elegido, puede dar muchos buenos resultados. Mal elegido, constituye una gran pérdida de tiempo. Evidentemente la elección no es asunto trivial. Un “buen” sistema experimental es aquel que, sien-

do lo más simple posible, permite investigar el mayor número posible de preguntas aún no contestadas. Lo que dijera Einstein de las teorías también se puede decir de los sistemas experimentales: que, para ser útiles, deben ser lo más simples posibles, pero no demasiado.

Es importante notar que las preguntas varían a lo largo del tiempo. Las preguntas de ayer no son las de hoy (como hemos visto en el ejemplo 1 de este capítulo). Del mismo modo, los sistemas experimentales usados con éxito varían a lo largo de los años. Por ejemplo, cuando Mendel, a mediados del siglo XIX, estudió las bases biológicas de la herencia, su sistema experimental (igual que el que planteamos en este capítulo) fueron las arvejas. Era fácil hacerlas crecer en su jardín, las distintas variedades tenían características claramente distinguibles y, además, era fácil cruzarlas. El mismo Mendel en su artículo original dice que el valor y la utilidad de un experimento están determinados por cuán adecuado es el material (en este caso, "sistema experimental") usado.

Cuando se trató de entender la herencia en un nivel más profundo, el sistema experimental elegido por T. H. Morgan a principios del siglo XX fue un gran acierto. Se trataba de la mosca de la fruta, o *Drosophila melanogaster* (poético nombre científico que significa "amante del rocío de panza negra"), que tiene ciclos de reproducción cortos (de dos semanas), un sistema genético sencillo (de cuatro cromosomas), y es fácil de mantener y cruzar. La mosca de la fruta ha sido, durante décadas, el caballito de batalla de los biólogos que estudian genética animal. En la década del treinta, H. J. Muller irradió moscas con rayos X e indujo mutaciones (por lo que recibió el Premio Nobel). Era la época de oro de la genética clásica: en las moscas de la fruta se pudieron observar y analizar por primera vez los cromosomas; el campo estaba fértil para caracterizar el gen –al que se tildó entonces como "el átomo de la biología"–. Max Delbrück, un físico teórico, aplicando métodos de cálculo de la física atómica a las mutaciones inducidas en las moscas de la fruta, determinó el tamaño de un gen.

Pero la *Drosophila* ya no era el sistema ideal para las nuevas preguntas que Delbrück quería contestar: ¿qué hace el gen?, ¿cómo interviene en el mecanismo de la herencia? Para abordar este problema se necesitaba un sistema cuyo aparato reproductor fuera lo más simple posible: un virus. Delbrück eligió un virus que usa bacterias *Escherichia coli* para reproducirse (llamado "bacteriófago"). El éxito de este sistema fue fenomenal y le mereció a Delbrück (y a sus colaboradores) el Premio Nobel. Una vez dilucidados los mecanismos fundamentales de la herencia, resultó cada vez

más importante estudiar genéticamente animales más parecidos a los seres humanos y se desarrolló entonces la genética del ratón como nuevo sistema experimental.

Estos ejemplos en el campo de la genética muestran cómo evoluciona la elección de sistemas experimentales fructíferos para investigar las preguntas aún no contestadas que se van sucediendo con el correr del tiempo y la importancia de elegir un sistema experimental adecuado para responder las preguntas formuladas.

EJEMPLO 3: EXPERIMENTOS CONTROLADOS[1]

Se dice que el primer experimento controlado fue diseñado y ejecutado por Francesco Redi en 1668. Su experimento intentaba demostrar que los gusanos que aparecen en la carne en putrefacción no se generan espontáneamente sino que nacen de huevos depositados en la carne por insectos. ¿Pero por qué era ésa una cuestión importante?

Desde la Antigüedad y hasta comienzos del Renacimiento la gente pensaba que muchos seres vivos provenían de la materia inanimada. ¿Cómo dudarlo? Todo el mundo sabía que organismos como gusanos, escarabajos, ranas y salamandras podían aparecer del barro, el polvo o la comida en descomposición. La generación espontánea de la vida (que así se llamó al hecho de que los organismos vivos pudieran provenir de materia no viva) era incluso avalada por los más grandes científicos y pensadores de la Antigüedad y de la Edad Media. Aristóteles mismo había asegurado que así era, y hasta el prestigioso científico belga Jean Baptiste van Helmont propuso, a comienzos del siglo XVII, su propia receta para producir animales: "Poner una camisa sucia o algunas mantas sobre un barril que contenga algunos granos de trigo, y en veintiún días los ratones aparecerán. Habrá ratones machos y hembras, y serán capaces de aparearse y reproducirse". Y no hay que olvidarse de que la Biblia decía que los mismos seres humanos habían sido creados del barro, justamente de la materia inerte. Nada había de raro en eso. ¿Para qué hacerse preguntas de algo tan evidente?

Francesco Redi, un reconocido médico italiano, fue el primero en poner a prueba la teoría de la generación espontánea mediante experimentos. En su trabajo de 1668, *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti* ("Ex-

1. El ejemplo que discutiremos en este apartado suele utilizarse en clase con otros objetivos pedagógicos, distintos del nuestro.

periencias en torno a la generación de los insectos”), Redi se concentró en el caso de las moscas que aparecían en la carne en descomposición. La gente de esa época consideraba que las moscas se originaban en la carne podrida. Redi quería saber si la carne realmente podía producir larvas y moscas, y por eso ideó una forma de poner a prueba esta idea. Después de mucho observar la carne podrida, Redi descubrió que a las moscas les encantaba visitar la carne en descomposición y que continuamente estaban revoloteando cerca, e incluso que se apoyaban sobre ella. También había visto algunos huevos de los que salían gusanos. Y notó que estos gusanos, luego de un tiempo, se convertían en insectos con alas. Esto le sugirió a Redi una hipótesis alternativa sobre el origen de los espantosos gusanos.

Redi realizó entonces sus famosos experimentos. El primero de los experimentos consistió en tapar un frasco para impedir que las moscas entraran a depositar huevos. Pero de poco sirve usar solamente este frasco. Si en efecto no aparecen gusanos, uno podría argüir que se debe a muchas otras causas posibles (la carne estaba muy seca, no pasó suficiente tiempo, ese tipo de carne no produce gusanos, esa semana hizo mucho frío, no es la época de los gusanos, el experimento se realizó en cuarto menguante, en el mes de sagitario, que no es propicio para los gusanos, etc.). Todas estas críticas pueden ser silenciadas de manera sencilla: exactamente en el mismo lugar y momento en que se deja el frasco cerrado, se prepara otro con el mismo tipo y cantidad de carne, pero abierto. Los dos frascos son tratados de la misma manera. El frasco abierto constituye un control, porque en él sí crecerán los gusanos y la única diferencia entre los dos frascos es la tapa.

Existe, sin embargo, otra objeción a este primer experimento, y muchos pensadores de la época la manifestaron: los gusanos no pueden crecer en el frasco tapado porque la tapa los asfixia; el aire del frasco es afectado de alguna manera al cerrar la tapa. Redi respondió a esta objeción modificando su experimento. En vez de usar una tapa hermética, puso sobre el frasco un trozo de gasa. La gasa deja entrar el aire pero impide que las moscas que vuelan alrededor se posen sobre la carne. En frascos tapados de esta manera tampoco crecen gusanos. Al realizar este experimento, Redi también dispuso frascos completamente abiertos a modo de control, para mostrar que no había problemas con la carne ni con el tiempo ni con otra variable cualquiera: la única diferencia era la gasa.

Estos experimentos son fácilmente repetibles en clase. Las pocas consideraciones técnicas a tener en cuenta son: humedecer la carne, contar con varios días (el ciclo de vida de una mosca es de aproximadamente diez días)

y no tenerle miedo a un poco de mal olor (que, sumado al espectáculo de las larvas, es francamente repugnante).

El experimento de Redi

El experimento puede abordarse de diversas maneras. Una es plantear las hipótesis alternativas e invitar a los estudiantes a que diseñen ellos mismos una forma de discriminarlas. Si los estudiantes no proponen el uso de controles, el docente puede hacer objeciones que impliquen la inclusión del frasco control ("¿Cómo sabés que los gusanos no aparecieron porque hacía demasiado calor?"). El rol de los controles puede discutirse en esta etapa de diseño experimental. Alternativamente el docente puede explicar qué es un control y realizar una discusión más rica con los resultados del experimento en la mano.

Al margen de los controles, esta experiencia abunda en oportunidades para examinar facetas del método experimental. Por ejemplo, pueden dárseles a los alumnos las siguientes consignas:

Antes de empezar, discutan y decidan:

- ¿Cada cuánto tiempo van a hacer las observaciones?
- ¿Quién/quiénes van a observar?
- ¿Qué cosas van a observar en cada frasco? (Por ejemplo, ¿van a contar el número de larvas? ¿Van a aclarar de qué color son? ¿Van a comentar en qué estado está la carne? Expliquen cada una de sus decisiones.)
- ¿Cuáles son los resultados posibles del experimento? ¿Qué concluirían de cada uno?

Cuando hayan decidido los detalles, preparen un póster para presentar al resto de la clase. Incluyan un esquema del experimento de manera que el resto de los grupos puedan entenderlo. Especifiquen: el título del experimento, la pregunta que quieren responder, un dibujo del diseño del experimento, materiales, variables que van a medir y método de medición.

Estas discusiones pueden darse en grupos y los pósteres producidos por cada grupo pueden ser discutidas por toda la clase. Si bien es muy posible que la mayoría de los grupos proponga métodos relativamente similares, el ejercicio de discutir los métodos de cada grupo es muy productivo para que los alumnos tomen conciencia de por qué eligieron esa forma de trabajar. Por otra parte, este trabajo permite a los alumnos ejercitarse en el proceso de evaluación entre pares y, también, en la presentación de diseños experimentales y resultados mediante pósteres (paneles). Ambas prácticas son habituales en el trabajo de los investigadores profesionales. Si no surgen de los otros grupos de estudiantes, el docente puede introducir algunas preguntas adicionales para guiar la discusión de los pósteres:

- ¿Cómo van a expresar los resultados?
- ¿Cómo van a compararlos a lo largo del tiempo?
- ¿Qué resultados esperan en cada uno de los frascos?
- ¿Cómo van a decidir cuál de las hipótesis es correcta?
- ¿Por qué eligieron tal o cual método de trabajo?

Una vez concluido el experimento se puede realizar una discusión grupal acerca de los resultados obtenidos, haciendo hincapié en las diferencias y similitudes que hayan surgido entre los grupos. Cada grupo puede completar su póster con los resultados de su experimento, y presentarlo al resto de la clase. Algunas preguntas útiles para guiar este cierre final son: ¿por qué algunos grupos obtuvieron resultados diferentes? ¿Cuáles son los factores que pueden haber influido? (por ejemplo el tipo de carne, si estaba más o menos húmeda, o si la dejaron al sol o a la sombra) ¿Cómo se podrían haber resuelto los problemas que surgieron durante la realización de la experiencia? (por ejemplo, cómo impedir que la carne se seque, cómo acelerar el proceso de descomposición o cómo resolver las diferencias de opiniones entre diferentes observadores). Ésta es nuevamente una buena oportunidad para aclarar que un experimento no sale “mal” (por ejemplo, si en uno de los frascos destapados no crecieron gusanos), sino que se deben buscar causas metodológicas para explicar los resultados dispares.

Estos experimentos pueden continuarse con varios otros concernientes a la generación espontánea, siguiendo, como sugerimos en el capítulo 4, una línea histórica.

Más allá de Redi

El debate sobre la generación espontánea quedó más o menos cerrado hasta la aparición del microscopio en la segunda mitad del siglo XVII, cuando nuevas formas de vida salieron a la luz. Los animálculos, como se llamaba a los microbios en esa época, eran tan diminutos y aparentemente simples que algunos pensaban que podían "surgir" de ciertos líquidos. En efecto, el clérigo inglés John Needham utilizó en 1745 un diseño experimental muy ingenioso para investigar el origen de los animálculos: en diferentes frascos colocó carne, vegetales y jugo proveniente de ellos, y los hirvió. Para esa época, la gente sabía que estos organismos microscópicos morían si se los sometía a temperaturas muy altas. De hecho, después de hervido, el líquido de los frascos no contenía microbios si se lo examinaba bajo el microscopio. Después de hervir los jugos, Needham tapó los frascos y los cerró herméticamente. Luego de unos días, los animálculos aparecieron en todos los frascos. Esto le demostraba a Needham que los microbios podían aparecer allí donde no había ninguno.

En 1765, el sacerdote y fisiólogo italiano Lazzaro Spallanzani repitió los experimentos de Needham, pero sellando los frascos que contenían los extractos de carne y vegetales antes de hervirlos. Y no encontró nuevos animálculos en ninguno de ellos, ni siquiera después de muchos días.

El debate seguía abierto, más que nunca. Cada parte creía fervientemente que tenía la razón sobre este tema. Los experimentos de Spallanzani no convencieron a Needham, que tenía dos objeciones importantes que hacerles: Needham sostenía que, por un lado, al hervir las sustancias por mucho tiempo y con los frascos sellados, Spallanzani había destruido la "fuerza vegetativa" o principio vital de esas sustancias, y, por otro, que había estropeado el aire que había dentro de los frascos, necesario para que los animálculos pudieran aparecer y sobrevivir. Spallanzani, por su parte, creía que Needham, antes de tapar los frascos, había dejado entrar algo presente en el aire que originaba los microorganismos.

Los experimentos tanto de Needham como de Spallanzani no son difíciles de realizar en condiciones escolares, aunque no describiremos aquí los detalles de tales actividades.

Finalmente fue Louis Pasteur quien resolvió la discusión. La hipótesis de Pasteur era que el aire contiene motas de polvo que transportan esporas o semillas de microorganismos. Si logramos dejar pasar el aire a un frasco pero no las motas de polvo que contienen esas esporas, entonces los microorganismos no crecerán en el líquido nutritivo (aunque tenga aire). Y si de-

jamos entrar las esporas, entonces los microorganismos crecerán (aunque supuestamente hayamos destruido el principio vital por ebullición). Para demostrarlo bastaba con imitar el magnífico experimento de Redi pero con una "gasa" de malla más fina que no dejara entrar las motas de polvo. Pasteur usó varios diseños; el más típico consiste en usar un tapón de algodón, que deja entrar el aire pero no el polvo ni las esporas adheridas a él. Comprobó que siempre que se impedía la entrada del polvo, el caldo de cultivo permanecía libre de microbios, pero que bastaba con "sembrar" algo de polvo para que crecieran. De nuevo, estos experimentos son fácilmente adaptables a condiciones escolares.

EJEMPLO 4: ANÁLISIS DE VARIABLES

Los estudiantes de corta edad (por lo general los menores de 14 años) tienen una gran tendencia a explorar el mundo físico: una combinación de ardiente curiosidad e irrefrenables deseos de tocar cosas y experimentar. Es sencillo cautivar a tal público con reacciones químicas vistosas o motivarlos con desafíos prácticos en los que haya que poner manos a la obra. Sin embargo, suele ser un poco más difícil transformar demostraciones vistosas y desafíos experimentales en situaciones educativas fructíferas en las que los estudiantes aprendan determinadas tácticas de indagación. Tal oportunidad es brindada por un experimento sencillo que usa una reacción conocida a veces con el nombre de "serpientes de faraón" (Estalella, 1918, p. 404). Presentaremos aquí la actividad en forma de juego o desafío.

El docente muestra a los estudiantes una pasta de color marrón o anaranjado oscuro sobre un platito. Los invita a salir a un lugar bien ventilado (por ejemplo, el patio del colegio); allí enciende un fósforo y lo acerca a la pasta. En unos segundos la pasta prende y comienza a arder sin llama. Se observan unas chispas tenues, internas y algo de humo se eleva de la masa. La reacción toma velocidad, sale más humo y algo voluminoso comienza a crecer en la pasta, allí donde se produce la combustión. Este volumen se proyecta hacia arriba y crece como un lento gusano: es de color verde pálido con manchas negras, pero a medida que crece las partes distales van virando a un amarillo intenso mate y luego a tenue rojo. Mientras tanto el "gusano" sigue creciendo y arrojando humo. Al tocarlo, el cilindro en crecimiento se derrumba: se trata de una columna de cenizas de colores, que de alguna manera recuerda a la lava de un volcán.

De más está decir que los chicos adoran esta demostración y cuando acaba piden repetirla. El docente entonces dice que lo lamenta pero que no tiene más pasta. Hay una buena noticia, sin embargo, y es que en el laboratorio están los tres ingredientes que conforman esta mezcla. Pero hay también una mala noticia y es que el docente no recuerda en qué proporciones hay que mezclarlas para que funcione (prueba definitiva de lo importante que es tomar nota siempre de lo que se está haciendo en el laboratorio). El desafío está entonces en averiguar en qué proporciones han de mezclarse los tres ingredientes para lograr el efecto deseado.

Los ingredientes, desconocidos para los estudiantes, son nitrato de potasio, bicromato de potasio y azúcar, los cuales hay que mezclar en las siguientes proporciones: 1 gramo de nitrato, 2 gramos de bicromato y 2 gramos de azúcar.

Para estudiantes de escuela primaria la actividad puede continuar de manera sencilla. Estos alumnos, según nuestra experiencia, tienden a probar sólo una de las posibles mezclas, algo así como su única apuesta a la solución del enigma. El docente puede sugerir que si preparan múltiples pruebas con diferentes cantidades relativas podrán hallar la proporción que buscan más rápidamente. La idea de cantidad relativa puede ser un buen tema a explorar para chicos de estas edades (remarcar que usar 10 gramos de cada una es lo mismo que usar 20 gramos de cada una). También se discute cómo medir la cantidad de una sustancia en forma de polvo. ¿Hay que pesarla o usar volumen? Nosotros hemos usado “cucharadas” como medida de cantidad. Uno de los focos principales de atención puede ser la necesidad de anotar cuidadosamente las proporciones que se usan y de usar siempre la misma unidad de medida (en el caso de las cucharadas, por ejemplo, verificar que estén siempre llenas por igual). Es posible que algunos chicos obtengan un resultado sorprendente o deseable de ser repetido y que no tengan la menor idea de qué hicieron. Este error es muy educativo: muchas veces vale la pena dejar adrede que suceda.

Para alumnos un poco más grandes (séptimo, octavo y noveno grados) la actividad ofrece otras posibilidades. Cuando cada chico o grupo de chicos enciende su propia mezcla observará efectos diferentes y esto plantea un estudio más profundo del fenómeno: ya no basta con encontrar la fórmula que “funciona” –muchas lo hacen– sino ver qué rol cumple cada una de las sustancias en el efecto final. Los estudiantes observarán que algunas mezclas arden rápida y violentamente mientras que otras se niegan a encender. Algunas arden bien pero sin producir crecimiento de ceniza alguno

mientras que otras producen enormes volúmenes. Algunas cenizas tornan a colores brillantes mientras que otras permanecen oscuras o negras. ¿A qué se debe cada efecto?

Este estudio puede ser llevado adelante por los mismos estudiantes. Lo importante es tratar de variar la cantidad de una de las sustancias por vez, dejando constantes las otras dos. Ésta es una táctica tradicional en ciencia: variar sólo un parámetro por vez, y el docente debe explicitarla cuando los alumnos estén probando las diferentes mezclas.[2]

Los alumnos tendrán que ponerse de acuerdo primero en cuáles serán las variables a medir (en este caso: volumen de la ceniza, color de la ceniza e inflamabilidad de la mezcla), luego en cuáles serán las variables a modificar (en este caso: las cantidades relativas de cada una de las sustancias) y finalmente cómo cuantificar los efectos (¿qué quiere decir “mucho volumen” o “poco color”?). Es deseable realizar la ignición de cada una de las muestras frente a todos los estudiantes para que el resultado, tal como quedará documentado, cuente con el consenso de todos.

En esta reacción, el nitrato de potasio, al ser calentado, se descompone liberando oxígeno, el cual promueve la combustión y oxidación de las otras dos sustancias. El azúcar se carameliza y arde, produciendo en parte una ceniza de carbón. El cromo del bicromato es responsable de los virajes de color al cambiar de estado de oxidación. Por lo tanto, mayor cantidad de nitrato produce mejor y más rápida combustión; mayor cantidad de azúcar produce mayor volumen de ceniza y mayor cantidad de bicromato da colores más intensos –mientras que su ausencia genera una ceniza negra–.

En este experimento no se producen explosiones pero hay que tomar ciertas medidas de seguridad. En primer lugar, no se debe introducir la mezcla a encender en un lugar comprimido, como un paquete cerrado o un frasco, porque entonces sí corremos el riesgo de una explosión. La mezcla puede ser encendida con fósforos por un estudiante, pero es conveniente contar *en todo momento con la presencia de un adulto*. Por último, es muy importante realizar estas igniciones en lugares abiertos, con buena ventila-

2. Si bien las variables deben ser separadas a la hora de planear y realizar el experimento, también es posible analizar los datos de múltiples experimentos con numerosas variaciones. En este caso, la “separación” de las variables se realiza mentalmente (o estadísticamente) después de realizado el experimento, y del análisis de los resultados pueden extraerse conclusiones significativas; sin embargo, no recomendamos esta estrategia con alumnos jóvenes.

ción, y evitar que los estudiantes permanezcan expuestos a la combustión: gases que contienen cromo (un metal pesado) son nocivos y debe evitarse la exposición a los mismos.

La interpretación final de los resultados es más fácil de lograr si todos los datos son volcados en una tabla general en el pizarrón, junto con una discusión de toda la clase.

Esta actividad busca desarrollar las aptitudes de observación, recolección de datos, diseño de experimentos, formulación de hipótesis (“Creo que el polvo naranja es responsable de darle el color a la reacción”), presentación de resultados, aislamiento de variables y análisis de parámetros e interpretación de resultados. En otras palabras, un simple desafío de cenizas y colores presenta al “método científico” en todo su esplendor.

6

LAVOISIER Y LA CALCINACIÓN DE LOS METALES: DISEÑO E INTERPRETACIÓN DE EXPERIMENTOS

Antes de llevar a cabo un experimento, un investigador debe trabajar duramente para prepararlo y, una vez que el experimento está terminado, debe trabajar tanto o más arduamente en interpretar sus resultados. Los experimentos no son exploraciones azarosas sino, por el contrario, manipulaciones que deben ser cuidadosamente planeadas para contestar preguntas o poner a prueba hipótesis. Una vez obtenido el resultado, el investigador debe interpretarlo, es decir, determinar su significado; extraer conclusiones y establecer el alcance y las limitaciones de las mismas. Estas tareas "secas" (fuera de las mesadas "mojadas" del laboratorio) son de suma importancia, pues sin ellas el experimento se torna un mero juego con aparatos sofisticados. Pero diseñar e interpretar experimentos no es fácil, y el docente debe buscar las oportunidades brindadas por el temario para enseñar estas capacidades.

El estudio de la calcinación de los metales por parte de Antoine L. Lavoisier y su uso ingenioso de la ley de la conservación de la materia brindan tal oportunidad. En este capítulo usaremos este caso histórico para ilustrar distintas formas de encarar abordajes metodológicos a un problema científico.

UN RESULTADO SORPRENDENTE

Muchos metales, al ser calentados o sometidos a una llama, sufren cambios químicos. En estas transformaciones los metales pierden sus propiedades típicamente metálicas (maleabilidad, brillo, conductividad térmica y eléctrica) y adquieren otras: se vuelven terrosos o polvorientos, sin brillo, y pueden cambiar de color. Este proceso se conoce con el nombre de “calcinación de los metales”. Los productos de la calcinación recibían en tiempos de Lavoisier el nombre genérico de “cales” o “cales metálicas”. Actualmente se los conoce con el nombre de óxidos (la palabra “herrumbre” se refiere únicamente al óxido de hierro).

Una de las propiedades que cambia cuando un metal se transforma en cal metálica es el peso (medido en una balanza). Las cales son invariablemente más pesadas que los metales que les dan origen. Uno podría preguntarse qué es tan asombroso acerca de esto: si muchas propiedades cambian con la calcinación, ¿por qué no el peso? ¿Qué tiene de especial el peso? Esta cuestión no estaba del todo clara hasta que en el siglo XVIII Lavoisier dio una respuesta precisa a esta pregunta, afirmando que el peso es un indicador de la cantidad de materia presente en un sistema, y por lo tanto una propiedad fundamental. En la época de Lavoisier se asumía, como una cuestión filosófica básica, que la materia no podía ser creada ni destruida (porque su existencia se debía a un acto inicial divino). Por lo tanto, decía Lavoisier, las cosas no pueden ganar ni perder peso sin que alguna otra cosa gane o pierda peso también. Es decir, el peso tampoco puede ser creado ni destruido. Notemos que en esa época esta idea era casi un axioma, un postulado filosófico y no el resultado de mediciones sistemáticas. De hecho, se le atribuye al mismo Lavoisier el haber acumulado la evidencia que sostiene a la conservación de la materia (medida con una balanza) como una certeza empírica.

Con esta visión particular, la ganancia de peso de las cales metálicas se vuelve un problema a resolver: ¿de dónde viene el peso extra? Éste será precisamente el problema que plantearemos en este capítulo como ejemplo, para el docente, de una actividad a desarrollar en el aula, y no en el laboratorio, cuyo énfasis está puesto en el diseño de experimentos y en la interpretación de resultados. A riesgo de ser reiterativos, volvemos a aclarar que todos los “experimentos” descriptos en este capítulo se ofrecen como fuentes de discusión con los estudiantes; no estamos sugiriendo que dichos experimentos deban realizarse en la clase, *sino todo lo contrario.*

Una discusión acerca de la calcinación de los metales debería iniciarse una vez que se haya mencionado, al menos de forma preliminar, la idea de la conservación de la materia. Para que la actividad aquí propuesta tenga sentido, tiene que garantizarse que el aumento de peso de las cales metálicas sea sorprendente para los estudiantes. Deberá, por lo tanto, evitarse discusiones demasiado detalladas que involucren gases o sistemas cerrados. A partir de una introducción más bien superficial de la idea de conservación de la materia, una posibilidad es realizar con los estudiantes una calcinación en el laboratorio "para comprobar la ley en el laboratorio".[1] También es posible discutir el procedimiento en el pizarrón. El experimento consiste en pesar un crisol limpio y vacío, luego poner algo de metal (polvo de cobre, por ejemplo) y volverlo a pesar; después se calienta el conjunto bajo la llama de un mechero Bunsen, se lo deja enfriar y se lo pesa de nuevo. Entonces se detecta el aumento de peso. El resultado será una aparente violación de la ley de la conservación de la materia, y la siguiente cuestión para los alumnos será tratar de resolver este misterio. ¿Es una violación o no? Y si no lo es, ¿de dónde viene el peso extra?

Para resolver el problema los estudiantes deberán primero proponer hipótesis y después sugerir experimentos para comprobar o refutar esas hipótesis. Los experimentos relevantes son difíciles de realizar en clase, pero sus resultados pueden ser relatados por el docente y analizados por el grupo.

UNA PALABRA SOBRE LAS PALABRAS

Sabemos ahora que el peso extra proviene del oxígeno del aire que se combina con el metal para producir la cal u óxido. Pero esto es lo que los alumnos deberán descubrir o tratar de dilucidar. Por eso sugerimos evitar la palabra "óxido", que delata que estos compuestos son combinaciones de metales con oxígeno. Por esta razón, para denominar a los óxidos de metales en general, recomendamos el uso de la expresión "cal metálica", "calcinado de metal" o, si se prefiere, la palabra inglesa *calx* que tiene un sonido misterioso y arcaico.

1. Si se desea realizar esta experiencia en el laboratorio, hay varios protocolos simples usando magnesio o cobre. Usando cantidades cercanas a los diez gramos se obtienen aumentos de peso mensurables.

La fraseología usada para enunciar la ley de la conservación de la materia puede producir impacto. De acuerdo con nuestra experiencia es fructífero enunciarla de la siguiente manera: “Cuando un sistema gana masa (manifestada en su peso en una balanza) quiere decir que algún otro sistema debe haber perdido esa masa. La masa que aparece debe de provenir de algún otro lado”. Esta explicación facilitará las discusiones sobre el diseño del experimento. La frase “la materia no puede ser creada ni destruida” es menos disparadora para pensar experimentos.[2]

LAS HIPÓTESIS

La actividad aquí propuesta se inicia con el misterio presentado en clases anteriores con respecto a la ganancia de peso de los metales al ser calcinados. ¿De dónde proviene la materia (el peso) extra? Los estudiantes propondrán diferentes hipótesis, algunas más interesantes que otras, pero evidentemente sólo una de ellas se corresponde con la realidad. Es importante entonces garantizar que esta hipótesis –que el peso extra provino del aire– sea puesta sobre el tapete. El docente deberá guiar la discusión en esta dirección y si a ninguno de los estudiantes se le ocurre esta posibilidad (aunque según nuestra experiencia siempre hay al menos un alumno que la propone) entonces será el docente quien deberá introducirla.

Algunos estudiantes sugerirán que el peso extra provino del recipiente en donde estaba contenido el metal, en este caso, el crisol. Ésta es una hipótesis que se puede descartar de antemano con sólo pensar un poco. El experimento de calcinación de un metal normalmente se realiza pesando primero el crisol, luego agregándole metal y volviéndolo a pesar. Una vez hecho esto se lo calienta hasta que el metal se haya calcinado (en el caso del cobre esto puede constatarse por el cambio de color: un viraje del rojo cobrizo a un marrón casi negro). Luego se pesa otra vez el conjunto, y se observa que pesa más que antes del calentamiento. Esto quiere decir que es el conjunto cobre-crisol el que aumenta de peso. Por lo tanto, el peso extra debe provenir de afuera del sistema cobre-crisol y no de una redistribución interna del peso. De este modo, esta hipótesis interesante puede ser descartada sin necesidad de expe-

2. Hablamos aquí de “masa” y “materia” como sinónimos, aunque hay diferencias entre ambos. Más aún, el término masa tiene varios significados (y la masa, distintas formas de ser medida), pero podemos definirlo como una medida de la cantidad de materia. También usamos el término peso para denotar la misma idea aunque sabemos que masa y peso difieren conceptualmente.

rimentos adicionales. Sí es posible que el aumento de peso del sistema cobre-crisol se deba a un aumento de peso del crisol en vez del cobre. Esta cuestión sí debe resolverse empíricamente y puede hacerse limpiando el crisol y pesándolo de nuevo: se observará que su peso no ha cambiado.

Otra hipótesis propuesta puede ser que el peso extra haya venido del fuego o del calor. Ésta no es una idea irrelevante; de hecho fue sostenida por Robert Boyle, un pensador de talla. En vez de desestimar este tipo de propuestas, habrá que analizar cómo es posible ponerlas a prueba, como veremos en el próximo apartado.

El docente deberá tratar de promover otras hipótesis. ¿Con qué otros objetos materiales está en contacto el metal? Eventualmente alguien propondrá que el peso extra pudo haber provenido del aire.[3] Sin duda es una hipótesis interesante y que puede salvarle el pellejo a la idea de la conservación de la materia, tan cara a Lavoisier.

Es posible que el docente obtenga alguna otra hipótesis no expuesta aquí. En nuestra experiencia las que presentamos son las únicas más o menos sólidas y/o habituales.

DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El siguiente paso consistirá en desafiar a los estudiantes a que inventen formas de poner a prueba las hipótesis. Preferimos invitarlos a trabajar en grupos y a describir con diagramas y textos el tipo de abordaje que usarán. En esta tarea, el docente deberá pasar por los grupos para orientarlos en sus discusiones. Lo deseable es que todos trabajen sobre todas las hipótesis; si no es así, al menos se deberá garantizar que todos los estudiantes trabajen sobre la hipótesis del aire.

Hipótesis del fuego como fuente del peso extra

La hipótesis aquí es que hay algo en el fuego o el calor que se incorpora al sistema cobre-crisol para hacerlo más pesado después de la calcinación.

3. Incluso alguien, sobre la base de alguna lectura previa, puede decir que el metal se combinó con oxígeno. Recalquemos entonces que en la época de Lavoisier no se conocían muchos gases y que en realidad la palabra oxígeno fue inventada por el mismo Lavoisier, varios años más tarde.

Comentamos más arriba que el peso del sistema después de la calcinación no varía, aun después de haberse enfriado. Por lo tanto ese "algo", que Boyle llama "partículas de calor," se aloja en el sistema crisol-metal y lo hace más pesado.

Es posible que surja una discusión acerca de si los objetos calientes son más o menos pesados que los fríos, con cierta referencia a los gases, pues muchos jóvenes están acostumbrados a repetir que el aire caliente sube y que "pesa menos que el aire frío". Pero el problema aquí no es el peso del calor en sí (cuestión que fue analizada lúcidamente por el conde Rumford[4] a finales del siglo XVIII), sino si las "partículas de calor" se alojan en el metal para hacerlo más pesado.[5]

Si el peso extra proviene del fuego, entonces el fuego deberá pesar menos después del proceso de calcinación. Pero, como se podrá suponer, esto es difícil de verificar. ¿Pesan acaso las llamas? Otra posibilidad es sugerir que el peso extra estaba alojado en aquello que se quemó para generar el fuego, como puede ser un leño. Evidentemente los leños son más livianos una vez que se los quema (se reducen a cenizas). Esta hipótesis en principio se puede poner a prueba, pero debe recordarse que los leños se reducen a cenizas aun en ausencia de metal a calcinar, lo cual quiere decir que el peso extra puede alojarse en diversos cuerpos. ¿Adónde va normalmente ese peso? Si el peso que pierde el leño no es exactamente el mismo peso que gana el metal, ¿cómo podemos estar seguros de que se trata de la misma materia?

En rigor, Boyle nunca puso a prueba su hipótesis. Para él, la idea de que el peso proviniera del fuego era una explicación de lo observado y no requería otros experimentos. Lavoisier estaba en desacuerdo. En sus escritos deja bien en claro que, según su opinión, Boyle está incurriendo en un error metodológico. Si el frasco donde se realiza la calcinación está abierto, entonces uno no

4. Rumford (quien, dicho sea de paso, terminó casado con la viuda de Lavoisier tras su muerte en la guillotina) trató de pesar el calor de muchas maneras. La más convincente consistió en poner en cada platillo de una balanza de dos brazos dos sistemas con capacidad calorífica diferente (agua y mercurio) de manera de quedar en equilibro. Después cambió la temperatura de todo el recinto. Cada sustancia absorbió una cantidad diferente de calor, pero ambas permanecieron en equilibrio en la balanza, mostrando que su peso no había variado.

5. Para aquellos docentes interesados en la historia de la ciencia, aclaramos que las partículas de calor de las que habla Boyle no tienen nada que ver con el flogisto, un tipo de sustancia propuesta teóricamente para explicar la combustión. Una de las consecuencias principales de la línea de investigación que Lavoisier inicia con estos experimentos fue la destitución de la teoría del flogisto, pero no nos ocuparemos de eso en este capítulo.

puede decidir si el peso extra proviene del fuego o de alguna otra fuente. La verdadera prueba, sostiene Lavoisier, consiste en calcinar el metal en un frasco herméticamente sellado. Si el peso del sistema frasco-metal aumenta, entonces nos veremos forzados a admitir que el peso puede provenir del fuego;[6] pero si no aumenta, entonces deberemos concluir que el peso extra del metal estaba dentro del frasco antes de la calcinación. ¿Y qué hay dentro del frasco antes de la calcinación? Las paredes del frasco, aire y... nada más. Fueron precisamente los experimentos con frascos sellados los que dieron credibilidad empírica a la ley de la conservación de la materia.

Esta discusión, que involucra frascos abiertos y frascos cerrados, puede proponerse al analizar la hipótesis de Boyle o puede ser estratégicamente pospuesta hasta que se analicen en mayor detalle los experimentos propuestos para abordar la hipótesis “atmosférica”.

Hipótesis del aire como fuente del peso extra

He aquí varias formas de probar que el aire, o una parte del aire, provoca el aumento de peso en la calcinación de los metales. Algunos de estos experimentos ofrecen evidencia más directa que otros. Ésta es una oportunidad de ejercitar el pensamiento hipotético-deductivo en los estudiantes. Vamos a presentar los experimentos de manera tal que los estudiantes aprendan a pensar en términos de diseño experimental, es decir, planteando qué resultados se esperan obtener en caso de que la hipótesis sea correcta y en caso de que no lo sea. Evidentemente, los resultados en los dos casos han de ser distintos para poder decidir si la hipótesis es válida. Es importante recordar que la puesta a prueba de hipótesis no es una exploración para “ver qué pasa” sino que se trata de una acción pensada deliberadamente a fin de aprobar o descartar una idea.

Experimento 1: realizar la calcinación en un frasco al vacío.[7]

¿Qué resultado esperamos obtener si se realiza la calcinación en un frasco al vacío y la hipótesis de que la materia extra proviene del aire es verdadera? Respuesta: no se observará calcinación.

6. En esa época se pensaba que las “partículas de fuego” eran tan pequeñas que podían atravesar las paredes de vidrio de un frasco.

7. El vacío en un frasco debe ser producido con una bomba de vacío, cosa no muy sencilla de lograr en los tiempos de Lavoisier.

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es falsa? Respuesta: el metal se calcinará aun en ausencia de aire.

Este procedimiento no demuestra que el aumento de peso se deba al aire, sino simplemente que el aire es necesario para que el proceso tenga lugar. El aire podría funcionar como un catalizador sin el cual la reacción no sucede, pero que no es consumido en el proceso. Sin embargo, los resultados de este experimento pueden ser sugerentes y brindar apoyo, aunque sea circunstancial, a la hipótesis del aire como fuente de materia extra.

Experimento 2: realizar la calcinación en un frasco cerrado.

¿Qué resultado esperamos obtener en este caso si la hipótesis es verdadera? Respuesta: la calcinación se detendrá tempranamente porque se acabará el aire dentro del frasco. Esto, por supuesto, dependerá de las masas relativas de metal y aire dentro del frasco, como analizamos a continuación.

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es falsa? Respuesta: la calcinación será completa.

Una derivación del experimento anterior: realizar la calcinación en frascos cerrados de distintos tamaños.

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es verdadera? Respuesta: la calcinación será más completa (una proporción más grande del metal se transformará en cal) en los frascos más grandes y más incompleta en los frascos más pequeños. Esto se debe a que hay más aire disponible en un frasco grande o, técnicamente, en un frasco con un volumen más grande que el de la muestra de metal que contiene.

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es falsa? Respuesta: la calcinación será completa en todos los frascos o variará al azar independientemente del tamaño del frasco.

Experimento 3: realizar la calcinación en un frasco cerrado relativamente grande con respecto a la muestra de metal (el tamaño, naturalmente, deberá determinarse por prueba y error), pesarlo antes y después de la calcinación.

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es verdadera? Respuesta: el peso del frasco cerrado al principio (frasco + metal + aire) será el mismo que al final (frasco + cal).

¿Qué resultado esperamos obtener si la hipótesis es falsa? Respuesta: el peso aumentará, porque la cal es simple, sencilla y mágicamente más pesada que el metal.

Muchos estudiantes arriban a distintas versiones de los experimentos que acabamos de delinear con mayor o menor ayuda por parte del docente. Una vez que los grupos tienen varios experimentos descriptos, cada grupo presentará a los demás sus ideas. De nuevo, no estamos sugiriendo la ejecución de ninguno de estos experimentos, sino tan sólo su descripción en el pizarrón a fin de estudiar sus posibles resultados. Es importante que los estudiantes puedan visualizar los distintos resultados posibles, antes de que el docente cuente cuáles son los resultados que se observan en la realidad. Este acto de la imaginación (en el que se visualizan posibilidades alternativas que dependen de si la hipótesis es cierta o no) es un trabajo de abstracción considerable que, de acuerdo con nuestra experiencia, puede ser dificultoso para estudiantes jóvenes. Sin embargo, de más está decir, constituye una habilidad esencial para el diseño racional de experimentos y para evitar el mero hacer sin propósito.

INTERPRETACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS DE LAVOISIER

Pues bien, clamarán los alumnos, ¿cuál *es* la respuesta? Los experimentos esbozados no pueden hacerse en clase porque, con el calentamiento a altas temperaturas, los gases en expansión harían estallar los recipientes. Lavoisier realizó estos experimentos y habitualmente se ponía una máscara de hierro para protegerse de las explosiones mientras trabajaba.

Lavoisier entendía que, si un sistema gana peso, entonces otro sistema debe perderlo. Si calentamos un frasco *abierto*, entonces estamos dejando que “cosas” (partículas materiales, aunque sean invisibles) entren en el frasco y salgan de él. De hecho, como ya dijimos, Lavoisier criticó los experimentos de Boyle (a través de los cuales éste concluyó que el fuego era la fuente del peso ganado) diciendo que el inglés debería haber sellado sus recipientes. Lavoisier por supuesto procedió de esta manera. Colocó metales (estaño en una ocasión y plomo en otra) en frascos; los selló derritiendo el vidrio y pesó cuidadosamente el conjunto. Luego calentó el recipiente. Una vez terminada la calcinación dejó que el sistema se enfriara y lo pesó de nuevo. El conjunto no había sufrido un cambio significativo[8] de peso.

¿Cuál es el significado de este resultado? Como el frasco está sellado, sabemos que ni el aire ni otro gas pueden entrar o salir del recipiente. Como

8. Esto quiere decir que el cambio de peso quedaba dentro del error experimental calculado para el experimento.

el sistema no aumentó de peso, podemos concluir que no intercambió materia alguna con el exterior. Si el peso del sistema hubiera aumentado tras la calcinación querría decir entonces que algo de materia fue creado de la nada (violando la ley de la conservación de la materia), o bien que algunas partículas materiales atravesaron las paredes de vidrio –recordemos que en esa época se consideraba que el fuego estaba constituido de partículas tan finas que podría atravesar el vidrio–. Pero esto no es lo que sucedió, de modo que Lavoisier concluyó que la materia que se agregaba al metal al calcinarse ya estaba presente en el frasco antes de la calcinación. Además del metal, el frasco contenía sólo aire. Lavoisier procedió entonces a abrir cuidadosamente un agujero en la pared del recipiente. Al acercar su oreja al agujero escuchó claramente el silbido del aire precipitándose adentro del frasco, como si hubiera un vacío en su interior. Ese vacío dentro del frasco indicaba que parte del aire había sido consumido o usado y ya no estaba más en forma gaseosa dentro del frasco. Cuando el silbido terminó, el peso del frasco había aumentado, y este aumento era igual al del metal al calcinarse. Es decir, la cantidad de aire que faltaba en el frasco después de ocurrida la calcinación tenía exactamente el mismo peso que el que había ganado el metal al calcinarse. Esto, más que nada, convenció a Lavoisier de que parte del aire del frasco estaba siendo consumida en una reacción química con el metal y que el aumento de peso del metal se debía al aire.

El docente puede proceder a analizar cada uno de los experimentos propuestos. Primero deberá detallar los resultados que Lavoisier obtuvo o que se obtienen en el laboratorio. Deberá dejar claro que estos resultados verdaderamente fueron obtenidos por investigadores de carne y hueso, y que ya no hay espacio para la especulación (de lo contrario estaremos vulnerando el aspecto empírico de la ciencia). Después, junto con la clase, podrá poner de relieve las conclusiones posibles de esos resultados.

Para finalizar, la clase puede armar en el pizarrón un resumen de toda la evidencia que indica que el aire es la fuente del peso ganado por el metal calcinado. Esta visión global pondrá de manifiesto las diversas formas en las cuales puede abordarse un problema y cómo la existencia de distintas líneas de evidencia da más respaldo a una conclusión. Puede destacarse cómo algunos resultados son más informativos que otros. Simplemente sellando un frasco, puede descubrirse que el aire es necesario para la formación de la cal metálica, pero el resultado no necesariamente muestra que el aire es consumido en ese proceso. El experimento que realizó Lavoisier al pesar los frascos es mucho más rico. La observación adicional –que en nuestro caso no fue prevista por el diseño experimental– de que el aire que está

afuera del frasco se precipita en su interior cuando éste se abre, apoya aún más la idea de que es efectivamente el aire el que se combina con el metal.

A través de estas actividades los estudiantes habrán ejercitado metodologías de la investigación y el pensamiento. En primer lugar han imaginado una serie de hipótesis a fin de explicar un fenómeno sorprendente. Para cada hipótesis, tuvieron que pensar una serie de experimentos para poner a prueba sus ideas. En cada caso, debieron imaginar qué tipo de resultado esperaban obtener en el caso de que su hipótesis fuera correcta y en el caso de que su hipótesis fuera incorrecta. En la investigación científica, éste es un ejercicio que hay que hacer cada vez que se diseña un experimento. Recordemos que no sólo son importantes los resultados que obtenemos sino aquellos que no obtenemos pero que podemos imaginar. Cuando el docente cuenta o describe los resultados verdaderamente obtenidos por Lavoisier u otros investigadores, los estudiantes deberán compararlos con los resultados que imaginaron y extraer conclusiones de dicha comparación. Finalmente, a través de estas discusiones, los estudiantes comprobarán el hecho de que existen múltiples formas de abordar una determinada pregunta. Todas estas cuestiones son facetas importantes del aspecto metodológico de la ciencia y en ningún caso hemos realizado un experimento, sino simplemente hemos pensado profundamente cómo hacerlos y qué significan.

A lo largo de todo este análisis, hemos recorrido una cuestión tal como estaba planteada para los investigadores en la época en que se hicieron los descubrimientos. Este enfoque histórico nos permite ver cuáles eran las preguntas relevantes en esa época y cómo fueron zanjadas, e incluso apreciar los debates que aparecían como consecuencia. Constituyen ejemplos de estos debates las diferencias entre Boyle y Lavoisier acerca del rol del fuego. El enfoque histórico tiene otra ventaja: los experimentos originales se realizan con tecnologías accesibles y entendibles para los alumnos, sin necesidad de hacer referencia a aparatos sofisticados y complejos.

Tercera Parte

El aspecto abstracto de la ciencia

7

IDEAS INVENTADAS

En este capítulo abordaremos el aspecto unificador y generalizador de las ciencias: la forma en que los científicos construyen explicaciones que sirven para ordenar y organizar una gran cantidad de fenómenos de la naturaleza y cómo logran hacerlo de la manera más económica y elegante posible.

CONCEPTOS Y ESQUEMAS CONCEPTUALES

J. B. Conant (1951) define la ciencia como "una serie de conceptos y esquemas conceptuales interconectados, que han surgido como consecuencia de experimentos y observaciones y que generan, a su vez, nuevos experimentos y observaciones". Desde este punto de vista la ciencia se nos aparece como un edificio de conceptos y esquemas conceptuales –lo que denominamos su *aspecto abstracto*– construido sobre una sólida base de experimentos y observaciones –su aspecto empírico–. Como hemos visto en los capítulos anteriores, los conceptos científicos más básicos, íntimamente ligados a los fenómenos, surgen de la experiencia directa de nuestros sentidos (por ejemplo, la carga eléctrica o la reacción química). Estos conceptos se relacionan entre sí constituyendo redes o esquemas conceptuales más abstractos (por ejemplo, las leyes de la mecánica clásica), que dan unidad a las observaciones y permiten explicar una gama grande de

fenómenos. Estos esquemas conceptuales están más alejados de nuestra experiencia sensorial directa: cuanto más alejados se encuentran, mayor será el rol que juegue en ellos nuestra imaginación –y aquí es donde entra en juego nuestra capacidad de abstracción–. Los esquemas conceptuales más amplios incluyen a los modelos teóricos y las teorías.

Los conceptos pueden definirse como ideas útiles porque nos permiten ordenar nuestras experiencias y sintetizarlas. Ziman (1968) da un ejemplo sencillo de esto empleando una idea de uso cotidiano. Supongamos que vemos un telón de teatro a medio subir y detrás de él cuatro palos de madera. Los palos se mueven en conjunto. Nuestra mente nos dice que allí hay una silla (aunque no la hemos visto). Así, el concepto "silla" nos sirve para explicar por qué los palos (las patas) se mueven al unísono y sentimos la confortable sensación de que todo encaja y tiene sentido. Además, si alguien mueve uno de los palos, la idea de silla nos permitirá predecir cómo se moverá el resto.

El concepto de silla es abstraído de nuestra experiencia y es de alguna manera un acto de invención de nuestras mentes. Éste es un ejemplo muy simple, pero sirve para ilustrar lo que sucede con construcciones teóricas más complejas: éstas se derivan de actos inventivos, que muchas veces implican una enorme imaginación (y a veces con resultados sumamente contraintuitivos). Albert Einstein, a quien todos identificamos con los aspectos más creativos de la ciencia, destacó que "los conceptos físicos son creaciones libres de la mente humana y no están, por más que lo parezca, determinados únicamente por el mundo exterior" (Einstein ye Infeld, 1938).

Muchas de las nociones de la ciencia son construcciones teóricas producto de la invención humana. Los átomos, los genes, el calor, la energía y los agujeros negros son ejemplos de ideas científicas útiles para explicar fenómenos observados. El flogisto, el calórico, el éter y los efluvios también han sido ideas inventadas para explicar fenómenos observados, pero con el desarrollo de la ciencia y la tecnología dejaron de resultar útiles, y han sido por lo tanto descartadas y sustituidas por otras.

En nuestra discusión del aspecto abstracto del conocimiento científico nos centraremos en las características principales de ciertos esquemas conceptuales denominados "modelos teóricos". Como veremos, este enfoque es provechoso y rico ya que, por una parte, el uso de modelos es constante en la actividad científica y, por otra, en el aula entender cómo se construyen los modelos sirve de punto de partida para comprender cómo se elaboran las teorías.

LOS MODELOS TEÓRICOS: UN EJEMPLO

A principios del siglo XIX los trabajos de Lavoisier, Proust y otros químicos habían producido una serie interesante y relativamente ordenada de observaciones sobre las reacciones químicas. Sabían, entre otras cosas, que las sustancias podían combinarse y descomponerse, que los elementos permanecían constantes en todas estas transformaciones y que formaban compuestos en porcentajes fijos de masas.

En vista de este cúmulo de datos, el docente inglés John Dalton (1776-1844) propuso la hipótesis de que todas las sustancias (es decir, todos los objetos materiales) están compuestas de partículas de materia a las que llamó átomos.[1] Dalton sugirió algunas características que los átomos debían tener: ser extremadamente pequeños, indestructibles, inalterables y capaces de establecer vínculos con otros átomos. Con estas dotes, la idea de átomo se convirtió en una forma de imaginar la materia y entender su comportamiento en las transformaciones químicas, es decir, se constituyó en un modelo de la estructura de la materia. Mediante el uso de este modelo numerosas observaciones cobraban sentido. Por ejemplo, los elementos podían entenderse como sustancias compuestas de un solo tipo de átomo. El hecho de que los elementos pudieran ser recuperados después de transformaciones químicas podía entenderse a partir de la idea de que los átomos son indestructibles e inmodificables. Y que las sustancias tuvieran una composición fija de elementos podía entenderse suponiendo que cada tipo de átomo tenía un peso diferente, y cada tipo de compuesto, una fórmula característica.

La idea de átomo de Dalton fue enormemente fructífera no sólo para entender lo que ya se sabía, sino para predecir nuevas observaciones. Sobre la base de su idea, Dalton predijo la ley de proporciones múltiples y también la posibilidad de construir una tabla de pesos relativos de los átomos (la tabla periódica, que fue construida después de su muerte). Además, la idea de átomo permitió comprender la diferencia entre el estado gaseoso y

1. La idea original de átomo data de aproximadamente 400 a.C. y se le atribuye al griego Demócrito. Durante la Antigüedad y la Edad Media el atomismo fue una postura filosófica (sin evidencia empírica y asociada al ateísmo). En el siglo XVII muchos científicos importantes (Newton, Boyle, Hooke) profesaban esta visión filosófica. Pero recién con Dalton la idea deja de ser una especulación filosófica y se transforma en un modelo teórico.

los estados líquido y sólido. En los gases podemos imaginar que las partículas están muy separadas, lo que les da la propiedad de ser compresibles. En cambio, podemos imaginar que las partículas que constituyen un sólido se encuentran a la distancia mínima posible entre partículas ("se están tocando"), lo cual hace imposible la compresión.

UN MODELO TEÓRICO ES UNA REPRESENTACIÓN MENTAL

Por lo general, los modelos ofrecen una imagen física que nos permite formar una representación mental de lo que sucede en los fenómenos bajo estudio por analogía con otros fenómenos mejor conocidos. Así, en el modelo de Dalton de la estructura de la materia, los átomos nos remiten a una imagen cotidiana de pelotas o bolas de billar. Esta representación mental es útil aun sin saber qué forma tiene el interior de un átomo o cuál es su estructura íntima; nos permite imaginar, por ejemplo, cómo colisionan los átomos en la pared de un recipiente que contiene un gas. De forma parecida, un modelo de circuitos eléctricos, por analogía con un sistema circulatorio, postula un fluido que se mueve dentro de los cables. En términos de la utilidad del modelo, no hace falta saber qué es lo que fluye, en qué dirección fluye o ni siquiera si realmente algo fluye. Lo importante es que el circuito se comporta "como si" algo fluyera y que imaginarlo de este modo nos permite predecir una serie de resultados que de otra manera no resultan comprensibles.

Con frecuencia un modelo es sólo una analogía. Konrad Lorenz, uno de los padres de la biología del comportamiento, propuso que los instintos de los animales se despertaban "como si" un tanque interno se llenara de un líquido (cuanto más lleno esté el tanque, será más probable que se dé el comportamiento instintivo). Basó este "modelo hidráulico" en las ideas de Sigmund Freud, que describía el psiquismo humano en términos similares. Ninguno de los dos investigadores creía que existieran "reservorios" de líquido en un sentido real de la palabra, pero los modelos eran representaciones mentales útiles para pensar el sistema y predecir resultados.

Como vemos, la misma naturaleza práctica de un modelo hace que la representación mental sea lo más simple posible. Se trata de una abstracción de la realidad, una representación idealizada para poder concentrarnos en ciertos aspectos del fenómeno que queremos explicar, sin tener que incorporar toda la complejidad y los detalles de un sistema real.

La naturaleza misma de un modelo hace que tenga limitaciones en su rango de aplicabilidad. Por ejemplo, la teoría cinética de los gases trabaja con un modelo de gas ideal en el que las moléculas no interactúan (no se atraen ni se repelen), pero este modelo sólo se ajusta a la realidad a presiones muy bajas; al aumentar la presión es necesario modificar ligeramente el modelo. En la biología de las poblaciones muchos modelos simples asumen que todos los individuos de una población se comportan de manera idéntica, lo cual puede no ser cierto cuando existen jerarquías o diferencias de sexo o edad marcadas.

En su representación más abstracta y utilitaria, un modelo puede estar expresado en términos exclusivamente matemáticos, y es entonces lo que se llama un modelo matemático. En este tipo de modelo se eligen aquellas variables que mejor representan la realidad (para lograr predicciones útiles) y se establecen relaciones matemáticas entre ellas. En biología, la dinámica de las poblaciones en el tiempo puede modelarse matemáticamente. La meteorología, que lidia con sistemas y procesos altamente complejos, trabaja constantemente con modelos matemáticos del clima.

LOS MODELOS NO SON CIERTOS NI FALSOS

Los modelos, entonces, buscan ser una representación simple de un sistema, que nos permite imaginar lo que no podemos ver. Dado que la representación es lo más simple posible para poder concentrarnos en los aspectos del sistema que nos interesan, el modelo tiene limitaciones. Estas mismas limitaciones nos llevan a entender que los modelos no son ni ciertos ni falsos: son solamente más o menos adecuados para describir la situación que se analiza. Apenas creado un modelo, el científico busca los puntos débiles, las limitaciones que le darán la pauta de cómo construir un modelo mejor. Por supuesto, un "buen" modelo tiene que ser lo suficientemente robusto como para soportar las pruebas experimentales derivadas de sus predicciones –en caso de que no sea así, no quedará más remedio que abandonarlo e ir en busca de un modelo alternativo que solucione las falencias del primero–.

El científico, entonces, tiene una relación dual con su modelo. Por un lado, mediante un acto creativo de su imaginación, es el inventor del modelo. Por otro lado, al buscar los límites en las aplicaciones de su modelo, el científico se convierte en crítico de su propia creación.

LOS MODELOS EVOLUCIONAN CON EL TIEMPO

Otro de los aspectos importantes de los modelos teóricos es que cambian con el tiempo a fin de acomodar nuevos datos, o bien porque son reemplazados por versiones más elegantes o económicas, o incluso simplemente porque pasan de moda.

Un interesante ejemplo es la evolución del modelo de la estructura interna del átomo. Es común en aulas de química y física encontrar en la pared láminas en las que un núcleo de átomo con forma de frambuesa está rodeado de un enjambre de aros concéntricos por donde circulan los electrones. Pero ¿cómo sabemos si el átomo es como lo muestra la lámina? Las propiedades del átomo descriptas en la lámina (la presencia de un núcleo y las órbitas de electrones) no son observables a simple vista, ni siquiera pueden verse con los más potentes aparatos de magnificación. En realidad, nuestra visión de la estructura atómica no se deriva de observaciones directas de ninguna especie, con o sin aparatos que aumenten nuestros sentidos: se trata, insistimos, de un modelo creado por la imaginación a fin de dar cuenta de numerosas observaciones y resultados experimentales.

A principios del siglo XX aparece el primer modelo moderno de la estructura del átomo. La idea primitiva del átomo de la época de Dalton se había enriquecido con el descubrimiento de que ciertos objetos eran capaces de adquirir carga eléctrica, lo que llevó a pensar que los átomos debían contener partículas cargadas. J. J. Thomson identificó y caracterizó a los electrones como partes constitutivas de todos los átomos. Como los electrones tienen carga negativa y el átomo es eléctricamente neutro, se hacía necesario postular algo con carga positiva dentro del átomo. A principios del siglo XX Thomson propuso un modelo que consistía en visualizar el átomo como una masa cargada positivamente con electrones negativos, distribuidos como las semillas en una sandía o la fruta abrillantada en un pan dulce. Los experimentos indicaban que los electrones negativos eran extremadamente pequeños comparados con el resto del átomo, y ése es el resultado que sugirió a Thomson la idea de las semillas de sandía.

Hacia 1910, J. Rutherford bombardeó láminas de muy pocos átomos de espesor con rayos que él sabía que eran haces de minúsculas partículas. Estas partículas veloces que atravesaban las láminas eran sin embargo sustancialmente más pesadas que los electrones. El modelo de Thomson, con las cargas repartidas en forma homogénea, predecía que las partículas veloces y pesadas usadas para bombardear las láminas deberían pasar a través de ellas casi sin desviarse de rumbo. Pero los experimentos de Rutherford

indicaban que, en cambio, algunas partículas (no todas) volvían para atrás, como si hubieran rebotado contra una pared.

Rutherford describe su impresión cuando un miembro de su equipo le refiere el resultado del experimento:

> Es lo más increíble que me ha sucedido en la vida. Era casi tan increíble como si hubiera disparado una bala de 20 cm hacia un blanco de papel de seda y la bala hubiera vuelto para atrás y me pegara. […] *Hice unos cálculos* y vi que era imposible obtener un resultado de ese orden de magnitud a no ser que se supusiera un sistema en el que la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un pequeñísimo núcleo (citado en Holton y Roller, 1958, pág. 615).

Rutherford modificó entonces el modelo de Thomson para acomodar sus resultados y propuso que un núcleo con carga positiva estaba rodeado de electrones pequeñísimos, y que el átomo era en su mayor parte puro vacío. Pero nótese que Rutherford no observó esa estructura, sino que debió "hacer unos cálculos" para poder empezar a concebirla.

El modelo de Rutherford no resolvía la cuestión de por qué los electrones negativos no caían hacia el núcleo positivo. Algunos intentaron explicarlo comparando al átomo con el sistema planetario solar: al igual que los planetas giran alrededor del Sol, los pequeños electrones negativos se movían en órbitas alrededor del núcleo masivo. En el caso del sistema solar los planetas no caen hacia el Sol porque hay un balance de "fuerzas" que hace que permanezcan en sus órbitas. Pero en el caso de cargas que giran en sus órbitas, la teoría clásica de electromagnetismo predecía que los electrones debían radiar luz en forma continua y, al perder energía, caer hacia el núcleo. Esto contradecía las observaciones, dado que el experimento de Rutherford indicaba una estructura estable del átomo.

Niels Bohr encontró la salida a este problema cuando, en 1913, incorporó al modelo planetario los conceptos, recientes en ese momento, de la teoría cuántica. Con electrones que emiten radiación sólo en forma cuantificada,[2] las órbitas se volvían estables y el modelo viable. Es éste el modelo atómico que se representa en la mayoría de las láminas escolares.

Actualmente el modelo de Bohr ha sido reemplazado. Hacia el año 1925 las ideas claras y simples de órbitas y saltos de electrones fueron suplantadas por una visión probabilística de los sucesos atómicos. En vez de órbitas

2. O sea, en paquetes discretos o "cuantos".

definidas ahora se habla de nubes que expresan la probabilidad de que en un momento dado el electrón se encuentre allí.

La mecánica cuántica, con su visión probabilística de la naturaleza microscópica de la materia, propone un modelo atómico mucho menos intuitivo que los anteriores. Los fenómenos no *son* de una manera determinada, sino que existe una cierta probabilidad de que sean de esa u otra manera. Aun así, la representación de las láminas tradicionales sigue siendo útil en muchos casos. Esto nos remite a un principio importante cuando se explican fenómenos científicos en el aula: la sofisticación del modelo que se usa para pensar en un problema no debe exceder las necesidades del problema. Así, por ejemplo, para comprender la ley de los gases de Boyle-Mariotte no hace falta conocer la estructura interna del átomo. Y para entender la tabla periódica no es necesario utilizar conceptos de la mecánica cuántica.

Este caso histórico ilustra cómo la imagen que tenemos de un determinado objeto o fenómeno cambia a medida que debe incorporar nuevos datos experimentales. Estas evoluciones de los modelos encierran un peligro a la hora de enseñar y aprender ciencia. Los estudiantes pueden interpretar que los científicos cambian nuestra visión de la realidad sin descaro, de manera tal que todo lo que creemos actualmente mañana puede resultar errado. La historia de la ciencia es una buena herramienta para abordar este problema. Recorriendo la génesis de las teorías científicas podemos ir mostrando, mediante ejemplos concretos, cómo las ideas y los cambios que van surgiendo con el tiempo, lejos de ser meras hipótesis sin fundamento, se van introduciendo para dar coherencia a los datos empíricos.

TEORÍAS

Ahora bien: ¿un modelo es lo mismo que una teoría? ¿Por qué a veces oímos hablar del modelo atómico y otras de la teoría atómica?

Por lo general, se denomina modelos a ideas que explican conjuntos acotados de observaciones y que se crean y se utilizan con el fin eminentemente pragmático de comprender un fenómeno específico. A medida que un modelo abarca más y más fenómenos aparentemente dispares, va tomando calibre. Así es que podríamos decir que las teorías son modelos de gran envergadura que explican vastos conjuntos de observaciones y plantean procesos fundamentales que rigen el mundo natural.

Las teorías abarcan dentro de su manto explicativo a leyes, modelos y, a veces, hasta otras teorías de menor alcance. Por eso, mientras que los mo-

delos son numerosos, las teorías son escasas y encapsulan lo más importante del conocimiento científico.[3] Tal es el caso de la teoría atómica que, como vimos, debe su contenido inicial a las ideas de Dalton, pero actualmente engloba la mayor parte del conocimiento de la química, incluyendo la teoría cinética de los gases y la teoría de enlaces químicos. En física la teoría de la relatividad incluye a la teoría newtoniana de la gravitación universal como caso especial, y ésta explica el modelo copernicano del sistema solar e incluye las leyes de Kepler. En biología, la teoría cromosómica de la herencia comprende a la teoría celular y a la teoría mendeliana de la herencia.

La amplitud del rango explicativo de una teoría y su profundidad hace que la formulación de un cuerpo teórico ocurra con muy poca frecuencia. Rara vez aparece un Newton, un Darwin o un Einstein que expanden nuestra manera de entender las cosas. La creación de una teoría nueva equivale a una “revolución científica” tal como la describe Kuhn (1962). Pero el trabajo cotidiano de un científico (lo que Kuhn denomina “ciencia normal”) no involucra la creación de teorías sino la elaboración, refinamiento y refutación de modelos teóricos acotados que sirven para situaciones particulares dentro de una teoría establecida. En otras palabras, el uso de “teoría” en ciencia se aleja de su significado coloquial; no es un hecho común que un científico llegue a formular una teoría –mientras que en su acepción cotidiana no pasa día sin que nos sintamos tentados de “teorizar” sobre algún fenómeno de la vida diaria–.

VALIDEZ DE LOS MODELOS Y LAS TEORÍAS

Al igual que los modelos, las teorías no son ciertas ni falsas sino más o menos válidas. Consideraremos válida a una teoría si de sus premisas básicas o postulados principales puede derivarse lógicamente el cúmulo de observaciones que la teoría busca explicar. Es decir, cuanto mayor es el conjunto de observaciones que adquiere sentido dentro de las ideas de la teoría, más creeremos en ella. Asimismo, cuanto más precisas sean las predicciones generadas por la teoría, mayor será nuestra confianza en ella.

3. En la física moderna se busca actualmente una Teoría Unificada (a veces mal llamada Teoría de Todo o TOE, *Theory of Everything*) que explique cómo operan las cuatro fuerzas fundamentales y, por lo tanto, todos los fenómenos físicos.

Una buena teoría es robusta, o sea, no se desmorona fácilmente. Es cierto que nuevos datos pueden volver obsoletos algunos conceptos que integran la teoría, pero esto no significa, necesariamente, que la teoría también se ha vuelto obsoleta. Tomemos por ejemplo la teoría electromagnética de Maxwell que da cuenta, entre otras cosas, del comportamiento de la luz. A principios del siglo XX el modelo de la naturaleza de la luz la representaba como una onda, es decir, la perturbación de un medio, de la misma forma en la que una ola es simplemente movimiento (perturbación) del agua (el medio). El medio de propagación de la luz se conocía con el nombre de "éter", pero en palabras de Shirley L. Quimby[4] el éter era simplemente "el sujeto del verbo oscilar para el caso de las ondas electromagnéticas".[5] Dicho de otro modo, el éter era una construcción teórica cuya existencia física no había sido detectada. Los experimentos de Michelson y Morley dieron por tierra con la idea de un éter real. Pero, curiosamente, esto no cambió el resto de la teoría electromagnética. El derrumbe de un modelo no siempre anula toda una teoría.

LEYES

En las ciencias físicas, por lo general, las teorías comprenden leyes que rigen los fenómenos y que se expresan en forma de relaciones matemáticas (y por lo tanto cuantitativas) entre variables (conceptos). A diferencia de un modelo teórico que nos da una visión del mecanismo por el que operan los fenómenos, las leyes sólo describen regularidades en la naturaleza, sin cuestionar las causas o el significado ni buscar conexiones más profundas con otros fenómenos. Sin embargo, algunas leyes son el sustrato mismo de grandes teorías y constituyen los pilares que las sustentan. Así ocurre, por ejemplo, con las leyes de Kepler y de Newton en el caso de la mecánica clásica, y con las leyes de Maxwell en la teoría electromagnética.

Aclaremos que una relación regular entre variables es sólo una hipótesis hasta tanto se haya dilucidado cuándo, cómo y dónde es válida (Toulmin, 1953). Por ejemplo, establecida la hipótesis de que la longitud de un pén-

4. Quimby fue profesor de uno de los autores de este libro en la Universidad de Columbia, Nueva York.

5. La luz es una onda electromagnética.

dulo es directamente proporcional al cuadrado de su período, es necesario verificar si esta relación se cumple siempre, o cuáles son sus límites. Experimentalmente se verifica que para grandes amplitudes de oscilación la relación no rige. O sea que la ley del movimiento del péndulo consiste en la relación matemática acompañada de la aseveración sobre su rango de validez. Sólo así la relación entre las variables deja de ser una buena hipótesis y pasa a ser una ley.

Mientras que las teorías son convincentes si explican y predicen un gran número de fenómenos, las leyes lo son si se cumplen de manera reproducible en numerosas circunstancias distintas. El proceso de hacer una ley convincente (su validación) consiste en repetir experimentos en variadas condiciones (es decir, encontrar su rango de validez). El mecanismo de validación de teorías, como vimos, es diferente. Los estudiantes deben conocer y apreciar esta diferencia.

LA CREACIÓN DE MODELOS TEÓRICOS EN EL AULA

Creemos que los modelos teóricos deben jugar un rol central en las clases de ciencia. Ponemos gran énfasis en los modelos porque, a diferencia de lo que ocurre con las grandes teorías, los alumnos pueden adquirir la experiencia directa de formularlos. Esta experiencia, argumentamos, les servirá de base para entender las teorías que deban aprender.

Idear un modelo es un acto creativo, que requiere imaginación y destreza. No es un arte que surge espontáneamente sino una herramienta que hay que aprender a usar. Una forma atractiva de entrenar a los alumnos en el uso de esta herramienta es desarrollar un currículo para un tema acotado, en el que los alumnos elaboren un modelo desde sus cimientos, mediante el uso de indagación guiada. Buenos ejemplos son la construcción de un modelo de flujo eléctrico para explicar los fenómenos relacionados con circuitos, el modelo de partículas cargadas a fin de explicar los fenómenos electrostáticos o los diferentes modelos de sistema solar para explicar el movimiento aparente de los cuerpos celestes en el firmamento.

El desarrollo paso a paso de un modelo requiere del uso de guías pormenorizadas de preguntas y experimentos adecuados, así como la concatenación de clases en secuencias relativamente estrictas. Por ejemplo, un currículo creado por uno de los autores de este libro para la formación de maestros primarios comienza con la elaboración de un modelo del sis-

tema solar a partir de simples observaciones guiadas de los movimientos del Sol, la Luna y las estrellas.[6] La vívida experiencia de los alumnos de haber construido un modelo (geocéntrico) es evocada luego a lo largo del curso y sirve de paradigma de la actividad científica. Éste es un punto interesante: no es necesario que cada tema contenga una elaboración pormenorizada de un modelo. Basta con ilustrarlo cuidadosamente una vez para poder luego decir, al estudiar otro tema enteramente distinto: "¿Se acuerdan de cómo fuimos inventando ideas para crear el modelo geocéntrico? Bueno, en el caso que estamos viendo ahora la idea que se propuso fue...".

Las grandes teorías en el aula

Las grandes teorías, necesariamente, deben tratarse en clase a partir de exposiciones del profesor, con poco aporte creativo de los estudiantes. Pero la experiencia adquirida por los estudiantes con la formulación de modelos será especialmente útil en la discusión de teorías. Los estudiantes sabrán tomar parte activa en clase cuando el docente explique cómo se alcanzó el conocimiento contenido en la teoría que se discute: sabrán exigir la evidencia que la sostiene, apreciar cómo se fue modificando su formulación, entender dónde ocurren los saltos creativos y debatir cuáles son las limitaciones, cuáles las predicciones y cómo se comprueba experimentalmente si se cumplen o no.

EL ASPECTO ABSTRACTO DE LA CIENCIA EN EL AULA

Cuando se trata de introducir el aspecto abstracto de la ciencia en el aula surgen dificultades que debemos considerar con cuidado. Sucede con frecuencia que los estudiantes no reconocen el carácter inventado de las ideas que se barajan y tienden a dotarlas de la misma realidad que las observaciones. Toulmin (1953) compara esta situación con la de un niño que confunde los personajes de los cuentos y cree que Napoleón, Hércules y la tortuga

6. Véase Rosenvasser Feher (2004) donde el desarrollo del tema está basado en el currículo mencionado.

Manuelita son tan concretos y reales como él mismo y su papá.[7] Quienes esperan "ver" la estructura interna de un átomo con electrones y protones o piensan que sus características son tan observables como las de un reloj cometen una equivocación similar. En nuestra experiencia es importante insistir, mediante ejemplos, en la diferencia entre observaciones e ideas inventadas para interpretarlas.[8]

Por lo general, gran parte de los esfuerzos de un docente de ciencia están puestos en lograr que los estudiantes aprecien el aspecto empírico de la ciencia y reconozcan que el conocimiento científico se deriva del estudio de la realidad. En este marco, las ideas inventadas que introducen los investigadores pueden parecer arbitrarias o dogmáticas si se enseñan sin la evidencia experimental que les dio origen. Más aún, cuando los estudiantes aprenden que las ideas (por ejemplo, la estructura del átomo) cambian con el tiempo (o sea que no sólo no son concretas sino que tampoco son permanentes), pueden pensar que todo está en tela de juicio y es cuestión de opinión, y que cualquier tipo de explicación tiene el mismo grado de validez.

Para encarar explícitamente estas dificultades, es fundamental que el docente deje bien claro que las ideas inventadas deben ser capaces de conectar evidencias. O sea, la imaginación responde al aspecto empírico de la ciencia, pero representa el aspecto abstracto en tanto va más allá de la evidencia experimental directa[9] y busca interpretarla.

Volvamos al ejemplo de la teoría atómica. ¿Tenía Dalton evidencia directa de la existencia de los átomos? Desde luego que no. Dalton propuso su idea trascendiendo la falta de evidencia directa: lo hizo para enhebrar y dar coherencia y unidad a la serie de observaciones recolectadas hasta ese entonces y por su utilidad a la hora de pensar en reacciones químicas. Su idea no es ar-

7. Nótese que estos personajes tienen distinto estatus de realidad: Napoleón vivió, Hércules es un mito y Manuelita un personaje literario. Las ideas abstractas en ciencias también vienen en distintos "sabores": no es lo mismo una conjetura, que un principio, una inferencia o una construcción teórica.

8. En el capítulo 9 mostraremos ciertos ejercicios simples que ayudan a los estudiantes a distinguir entre observaciones e ideas inventadas.

9. Algunas ideas en ciencias son introducidas por audaces actos de la imaginación, pero con el tiempo resultan ser enteramente convincentes o totalmente reales. La idea de que los planetas son "mundos" como la Tierra (y no simplemente puntos de luz en el cielo nocturno) fue inicialmente una idea inventada que formaba parte del modelo copernicano del sistema solar. Actualmente esta idea es observable mediante sondas espaciales. Pero esto no quita su naturaleza inventada inicial.

bitraria; está determinada en parte por los fenómenos a explicar. Pueden existir modelos alternativos y hasta mejores, pero todos ellos deben ceñirse a la evidencia para ser válidos.[10]

Parte del trabajo en el aula, entonces, deberá estar focalizado en estudiar la naturaleza de las ideas que se introducen: cómo ayudan a entender lo que se estudia y cómo difieren de aquello que se observa directamente. Otra parte importante del trabajo en el aula deberá emular o enfatizar la doble función del científico: la creación de ideas y la argumentación crítica. El docente alentará a los alumnos a que propongan ideas explicativas plausibles, pero los alumnos deberán asegurarse de que verdaderamente funcionan mediante experimentos que pongan a prueba predicciones derivadas de esos modelos, discusiones y crítica mutua (véase el aspecto social de la ciencia en el capítulo 10).

Finalmente, cuando hablamos de modelos teóricos hay un curioso e instructivo paralelo entre la construcción del conocimiento científico por la comunidad científica y la construcción del conocimiento científico en el aula. Un modelo se construye en ciencia a fin de “comprender” o “explicar” una serie de observaciones. Las palabras *comprender* o *explicar* en este contexto significan dos cosas: por un lado el modelo debe poder dar cuenta de las observaciones a las que hacemos referencia; por otro lado, debe ofrecer predicciones sobre observaciones aún no realizadas, es decir, debe iluminar el terreno no transitado. De manera análoga, en el contexto educativo la palabra “comprender” implica que los estudiantes han adquirido un esquema de pensamiento que les permite encontrar conexiones entre piezas de su conocimiento previo y, además, les permite resolver problemas novedosos.

Esto significa, y el docente debería tenerlo en cuenta, que enseñar adecuadamente cómo se construye y usa un modelo teórico (o teoría) es en sí mismo una lección sobre lo que significa verdaderamente aprender. Desde

10. A fines del siglo XIX y principios del XX se produjo un debate acalorado entre Ernst Mach y Max Planck sobre la existencia misma de los átomos –debate que devino básicamente en una confrontación epistemológica–. Mach sostuvo que la idea de átomo era inútil y hasta ridícula, y que debía ser descartada. Para Planck los átomos eran realidades físicas, a pesar de que fueran invisibles. El hecho de que tal debate pudiera consumir a dos de las mentes más sagaces y penetrantes de un siglo pone de relieve la sutileza e importancia del aspecto abstracto de la ciencia, y hasta qué punto las construcciones teóricas pueden estar alejadas de nuestra experiencia sensorial y nuestro sentido común.

el punto de vista metacognitivo, comprender un modelo teórico es aprender a aprender ciencias.

Incluimos a continuación un resumen de las prácticas pedagógicas que hemos ido discutiendo a lo largo de este capítulo. En los próximos dos capítulos damos ejemplos de construcción y uso de modelos en el aula. En el capítulo 8 se describirá cómo los alumnos pueden realizar predicciones sobre las posiciones de los astros en el cielo usando el modelo geocéntrico del sistema solar. En el capítulo 9 una secuencia de preguntas guía a los alumnos en la construcción del modelo de carga electrostática.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO ABSTRACTO DE LA CIENCIA

- Distinguir entre observación e interpretación.
- Ejercitar la formulación de modelos en clase.
- Clarificar la necesidad de introducir ideas inventadas.
- Enfatizar la conexión entre el aspecto creativo y la base empírica de la ciencia.
- Realizar predicciones sobre la base de los modelos desarrollados y ponerlas a prueba experimentalmente.
- Recalcar mediante ejemplos la forma en que una teoría da sentido a amplios conjuntos de observaciones.
- Analizar casos históricos de desarrollo de preguntas, hipótesis, leyes, teorías y modelos teóricos.

8

LOS ASTROS CELESTES: EL USO DE UN MODELO

En las clases de física se suelen incluir algunos temas de astronomía para llegar a la gran síntesis newtoniana: la unidad explicativa de los movimientos de los objetos en la Tierra y en el cielo. En general se introducen las leyes cinemáticas de Kepler y las leyes dinámicas de Newton que describen en forma matemática, respectivamente, el cómo y el porqué del movimiento de los planetas alrededor del Sol (y de las lunas alrededor de sus planetas).

Al reducir el currículo a este planteo mínimo se desperdician dos magníficas oportunidades de transmitir a los estudiantes aspectos fundamentales de la ciencia. En primer lugar, la oportunidad de poner a los alumnos en contacto directo con el cielo, que se tardó tantos siglos en entender. En segundo lugar, la ocasión de transitar los razonamientos que condujeron a la invención y al refinamiento de modelos para entender los movimientos de los astros en ese cielo. Es cierto que hoy todos “sabemos”que la Tierra rota y viaja en su órbita alrededor del Sol. Pero la mayor parte de las veces este saber es el resultado de un adoctrinamiento temprano y no de una familiaridad con los fenómenos básicos ni con las ingeniosas maneras de interpretarlos.

Cuando miramos el cielo vemos a simple vista la Luna, el Sol y las estrellas. Todos parecen moverse alrededor nuestro, de este a oeste. Pero observándolos en forma sistemática y con detenimiento, se constata que se

mueven a velocidades diferentes. Hace miles de años, los babilonios y los egipcios conocían bien esos movimientos y sabían predecirlos usando tablas de datos o construcciones orientadas hacia puntos cardinales importantes. (Por ejemplo, el templo de Amen-Ra en Karnak mira hacia el lugar en el horizonte donde sale el Sol en el solsticio de verano; las pirámides de Giza y Sakkara y los restos de los templos de Palmira y Jerusalén están orientados hacia donde sale –o se pone– el sol en los equinoccios.) Las predicciones eran importantes por razones religiosas y agrícolas. Permitían marcar el paso del tiempo y establecer, por ejemplo, cuándo se debía sembrar y cuándo empezarían las inundaciones de los grandes ríos (en el solsticio de verano, en el caso del Nilo; en el equinoccio de primavera, en el caso del Éufrates).

Los griegos, alrededor del año 400 a. C., fueron los primeros en plantearse el problema de cómo describir esos movimientos y modelarlos en un simple sistema coherente. Hacia el primer siglo después de Cristo, esta preocupación culminó con el modelo que llamamos ptolemaico. Éste es un modelo geocéntrico:[1] la Tierra está inmóvil en el centro de un sistema de esferas que acarrean a los astros y se mueven con velocidades constantes (pero diferentes las unas de las otras). Este modelo explica satisfactoriamente todo lo que observamos a simple vista: los movimientos de los astros, los eclipses y las fases de la Luna.

Pero con el modelo ptolemaico era complicado dar cuenta de los movimientos de los planetas, y hacia el siglo XVI Nicolás Copérnico propuso un modelo cuya virtud, según él mismo decía, era la simplicidad con que se explicaban los movimientos de los planetas. Este modelo era heliocéntrico: el Sol, inmóvil, ocupa el centro del sistema, las estrellas están inmóviles y la Tierra gira sobre su eje y en torno al Sol (la Luna, a su vez, en torno a la Tierra).

En el aula, al introducir directamente el sistema heliocéntrico –que es el que aceptamos ahora– pasando por alto dos mil años de evolución del pensamiento científico, se suele crear una imagen desvirtuada del sistema geocéntrico, al que se percibe como erróneo y no como un modelo de validez limitada.

Nuestra intención en este capítulo es presentar al sistema geocéntrico como un modelo útil, que sirve para hacer predicciones válidas de los movimientos del Sol, las estrellas y la Luna (y de las fases de esta última) tal

1. El modelo ptolemaico no es el único modelo geocéntrico propuesto a lo largo de la historia, pero sí el más complejo y famoso.

como se ven en el cielo a simple vista. La belleza de este modelo se debe a que es sumamente intuitivo: modela lo que vemos suceder (todo da vueltas alrededor nuestro) y lo que sentimos (que estamos quietos).

Las actividades que proponemos consisten en usar un modelo cualitativo para resolver problemas que involucran al Sol, la Luna y las estrellas. Los alumnos usarán el modelo geocéntrico y luego verificarán que los resultados serían los mismos usando el sistema heliocéntrico.

Uno de los puntos a destacar con estas actividades es que no siempre se necesita usar el último modelo (el más correcto). Todos los modelos tienen límites de validez; lo importante es conocer esos límites para saber cuándo es permisible usar uno u otro modelo. Por ejemplo, el modelo geocéntrico es totalmente aceptable –y de hecho se usa– para orientarse al navegar en barco. No así para mandar un vehículo al espacio al encuentro de Júpiter.

El criterio de simplicidad y conveniencia al elegir el modelo a usar fue, justamente, lo que impulsó la adopción del sistema heliocéntrico. Copérnico, el "padre" de este modelo, no lo concibió a fin de representar los movimientos de los astros como son en realidad, sino como un modelo en el que los movimientos planetarios conocidos resultaban más simples de describir que en el sistema ptolemaico (geocéntrico) aceptado en esa época. Así lo dice Copérnico en su dedicatoria al papa Pablo III[2] en el libro (publicado en el año 1543) en que describe el modelo heliocéntrico: admite que su sistema es casi contrario a nuestro entendimiento pero arguye que es armonioso, simétrico, ordenado y que seguramente refleja la mente de Dios.

OBSERVACIONES Y MODELOS

Los modelos geocéntrico y heliocéntrico fueron creados a lo largo de la historia para explicar los movimientos de los astros tal como los vemos desde la Tierra. Ambos surgieron para dar cuenta de observaciones hechas en la Antigüedad. Nosotros, junto con nuestros alumnos, podemos efectuar las mismas observaciones, de manera muy simple, como relatamos a continuación.[3] Veremos, paso a paso, cómo las observaciones encajan en modelos sucesivos que conducen a la construcción del modelo ptolemaico. Sin

2. Hay quienes arguyen que la dedicatoria no fue escrita por Copérnico y que, por lo tanto, no sabemos claramente cuál era su postura frente al problema. Véase Gingerich (2004).

3. Para una versión más detallada de las observaciones y la construcción de los modelos, véase Rosenvasser Feher (2004).

embargo, el eje de este capítulo no será la construcción de un modelo sino su uso para predecir y explicar los fenómenos observables.

Al mirar el cielo, tanto nocturno como diurno, veremos que el Sol, la Luna y las estrellas se mueven alrededor de la Tierra y dan aproximadamente un giro completo en 24 horas, desplazándose de Este a Oeste. Podemos imaginarnos sin dificultad que vivimos en el centro de una enorme esfera hueca que llamamos “cielo”, en la cual están adheridos los cuerpos celestes. Si la esfera rota, los cuerpos celestes cambiarán conjuntamente de posición a nuestro alrededor. Éste es un modelo primitivo de los fenómenos observables.

Si observamos el cielo día tras día y semana tras semana a lo largo del año, descubriremos aspectos interesantes e importantes del movimiento de los astros. Veremos, por ejemplo, que la Luna no sólo se ve de noche sino, a veces, de día, cuando el Sol también está visible en el cielo. Constataremos también que la Luna sale y se pone un poco más tarde (casi una hora) de día en día. Nuestro modelo puede acomodar estas observaciones suponiendo que el Sol y la Luna se mueven alrededor de la Tierra a velocidades diferentes. Los antiguos visualizaron esta situación imaginando que cada astro celeste estaba “pegado” o “sumergido” en una esfera diferente que se mueve independientemente de las otras. Suponiendo que la esfera que acarrea la Luna gira más lentamente que la del Sol, se explica por qué la Luna cada día sale y se pone más tarde, o sea, se retrasa con respecto al Sol. El retraso es de 90° en una semana, o sea que el Sol y la Luna vuelven a las mismas posiciones relativas cada cuatro semanas (28 días: casi un mes).

Las fases de la Luna resultan de esta diferencia de velocidades. El Sol siempre ilumina la semiesfera de la Luna que tiene enfrente. Pero vista desde la Tierra, esa semiesfera se ve como Luna llena cuando el ángulo Luna-Tierra-Sol es de 180° y se ve toda la semiesfera iluminada. Se ve como Luna nueva cuando la Luna está entre la Tierra y el Sol y no se ve para nada la parte iluminada. Y se ve como un cuarto de Luna cuando el ángulo Luna-Tierra-Sol es de 90° y 270°, y desde la Tierra se ve la mitad de la semiesfera iluminada.[4]

4. Esto es sencillo de visualizar con una lámpara fija (que representa al Sol) y una pelotita de ping-pong (que representa la Luna) montada con plastilina a un palito que sirva para que el observador terrestre la tome en su mano. El observador, con el brazo estirado y sosteniendo la pelotita a un nivel levemente superior a su cabeza (para evitar eclipses), reproduce los cuatro ángulos Luna-Tierra-Sol que dan origen a las fases mencionadas. La superficie blanca y lisa de la pelotita muestra claramente la mitad iluminada por el Sol y la parte que ve el observador terrestre.

Las observaciones realizadas a lo largo de días y semanas revelan otro patrón: las estrellas salen y se ponen más y más temprano cada noche. Si determinada constelación del zodíaco[5] aparece en el horizonte este a medianoche, la noche siguiente aparecerá cuatro minutos antes. Estos pocos minutos resultan en una diferencia apreciable en el transcurso de numerosas noches: dos horas en el transcurso de un mes; 24 horas en un año. Este fenómeno se incorpora al modelo suponiendo que las estrellas están fijadas a una esfera que se mueve más rápido que la esfera del Sol; se le adelanta 360° en un año, o 1° por día.

Las estrellas se mueven todas juntas sin cambiar su posición relativa unas con respecto a otras (esto es lo que permite agruparlas en constelaciones). Pero observaciones cuidadosas revelan que existen otras estrellas "vagabundas" que, a lo largo del año, se van desplazando de un grupo de estrellas a otro; hoy están cerca de tal constelación y mañana cerca de tal otra. Precisamente porque cambian de posición, los antiguos las llamaron "planetas", palabra griega que significa "vagabundo".

Este movimiento de los planetas, independiente del de las estrellas, significa que, en el modelo geocéntrico que venimos desarrollando, los planetas deben tener sus propias esferas celestes. Pero el movimiento de los planetas es complejo. Si bien se mueven de Este a Oeste como todos los otros astros, lo hacen con velocidades cambiantes. Normalmente, cada planeta se mueve con su propia velocidad, más lentamente que las estrellas "fijas". Pero en un momento dado (distinto para cada planeta), acelera su marcha y se adelanta a las constelaciones. Esta marcha acelerada es breve y el planeta retorna a su lenta velocidad anterior: así, las estrellas vuelven a dejarlo atrás.[6] Este movimiento es difícil de explicar en términos de esferas celestes que se mueven con velocidades constantes.[7] Para poder hacerlo, Ptolomeo tuvo que complicar el modelo y proponer varias esferas concatenadas para cada planeta. Así es cómo el sistema geocéntrico, en todo su esplendor ptolemaico, requería 55 esferas para dar cuenta de todos los movimientos celestes.

5. Las constelaciones del zodíaco son las que aparecen en la zona del cielo donde se mueve el sol.

6. Puesto que los planetas eran considerados "estrellas que vagabundeaban", era natural describir en qué forma difería su movimiento del de las "estrellas fijas". Siendo así, se describía el movimiento de los planetas con respecto a las estrellas (en vez de respecto al horizonte), diciendo que los planetas se mueven usualmente de Este a Oeste, pero que cada tanto dan "marcha atrás" con respecto a las estrellas. A este movimiento (que coincide con la época en que los planetas se ven más brillantes) se lo denomina "retrógrado".

7. El pensamiento aristotélico, que rigió con gran fuerza durante siglos, requería que los astros se movieran con velocidades constantes en órbitas circulares trazadas sobre esferas.

En la propuesta heliocéntrica, en cambio, los planetas, igual que la Tierra, describen órbitas alrededor del Sol. A diferencia de lo que ocurre en el sistema ptolemaico, el vagabundeo se explica en forma relativamente simple, con seis órbitas alrededor de un Sol quieto.[8]

PREDICCIONES ACERCA DEL SOL, LA LUNA Y LAS ESTRELLAS

Las actividades que proponemos suponen que los estudiantes ya han realizado las observaciones del cielo mencionadas y que saben cómo estas observaciones condujeron a los antiguos al modelo ptolemaico del sistema solar. Sobre la base de estos conocimientos, los estudiantes deberán resolver una serie de problemas de predicción. (Nos ocuparemos sólo del Sol, la Luna y las estrellas; dejaremos de lado a los planetas.) En el recuadro siguiente figuran las preguntas.

Problemas a resolver sobre los movimientos del Sol, la Luna y las estrellas

1. Un observador terrestre ve la luna llena al amanecer. ¿Dónde está la Luna? ¿Sobre el horizonte este u oeste, o a mitad de camino entre el Este y el Oeste? Esta “mitad del camino” se llamará, de aquí en adelante, el “meridiano” del observador. Técnicamente, el meridiano es la línea imaginaria que va del polo sur al polo norte y pasa justo por encima de la cabeza del observador.
2. Un observador terrestre ve un cuarto de luna menguante levantándose en el Este. ¿Qué hora es?
3. Un observador terrestre ve un eclipse de Sol. ¿Cuál es la fase de la Luna?
4. Un observador terrestre ve la estrella “E” en el meridiano a medianoche. ¿A qué hora estará “E” en el meridiano dos semanas más tarde?
5. Un observador terrestre ve la estrella “E” poniéndose al amanecer. ¿A qué hora se la podrá ver dentro de 9 meses?

8. Esto se explica así a partir de Kepler, cuando se acepta que las órbitas son elípticas y las velocidades de los planetas no son uniformes. Copérnico todavía conservaba los movimientos sobre esferas que rotaban con velocidades constantes, de modo que, además de las seis órbitas, necesitaba esferas adicionales para describir las observaciones.

Evidentemente, para contestar este tipo de preguntas es preciso hacer uso de un modelo que represente el movimiento de los astros. A los alumnos les pediremos que usen, en secuencia, el modelo geocéntrico y el heliocéntrico.

Si bien se pueden resolver los problemas planteados mediante diagramas y esquemas hechos con papel y lápiz, lo ideal es armar un sistema que reproduzca la visión mecanicista (o mecánica) de los modelos prenewtonianos.

Según nuestra experiencia, la mejor forma de construir los modelos consiste en crear lo que llamaríamos una "antropomorfización",[9] que sería una teatralización en la que los estudiantes representan procesos naturales. O sea, los estudiantes crean un modelo físico y dinámico de un fenómeno natural, volviéndose ellos mismos los protagonistas del proceso. En el caso que estamos considerando, los estudiantes asumen los roles de los astros celestes –Tierra, Sol, Luna y estrellas– y actúan dentro de un modelo del sistema solar. Este abordaje de la resolución de los problemas tiene una variedad de atributos positivos, como la facilidad con que se arman los modelos y la interacción cenestésica de los estudiantes con los movimientos de los astros, que les permite literalmente "ver" el cielo desde la Tierra.[10]

Brevemente, para antropomorfizar los modelos celestes, los estudiantes se dividirán en grupos de a cuatro. En cada grupo, un estudiante representará la Tierra, otro la Luna, otro el Sol y el cuarto una estrella zodiacal. Los actores se turnarán en los roles asumidos para que todos tengan la oportunidad de ser la Tierra y ver los movimientos como los vemos cuando observamos el cielo. El escenario (el suelo) es el plano en que se mueven los astros.[11]

ACTIVIDADES GEOCÉNTRICAS

En el recuadro siguiente daremos las instrucciones para los alumnos, detallando el procedimiento para resolver los cinco problemas dados.

9. En inglés se conoce como *role playing.*

10. En términos generales, la teatralización sirve para dar un cambio de ritmo a las clases y para involucrar a todos los alumnos activamente; también promueve el trabajo en grupos, ayuda a romper barreras de relación entre los estudiantes y da la oportunidad de participar, y aun de descollar, a alumnos que no lo hacen en otras circunstancias.

11. En lenguaje técnico, el suelo simula a la eclíptica, que es el camino que sigue el Sol en el cielo.

Procedimiento para resolver los problemas usando el modelo geocéntrico

Ustedes van a ser los actores en una teatralización del modelo geocéntrico. El objeto es hacer predicciones sobre los movimientos aparentes del Sol, la Luna y las estrellas del zodíaco.

Divídanse en grupos de cuatro personas: uno de ustedes será la Tierra, otro la Luna, otro el Sol, el cuarto una estrella zodiacal. Van a turnarse para que todos tengan la oportunidad de ser la Tierra y ver las cosas como las vemos en el cielo. Estamos usando el modelo geocéntrico, de modo que la Tierra está totalmente quieta y los astros se mueven a su alrededor. El piso es el escenario: la parte del cielo donde se mueven los astros.

Los astros se mueven en círculos concéntricos alrededor de la Tierra, tal como en el modelo griego que los ubicaba según la velocidad a la que los vemos moverse: cuanto más lento es el movimiento de día en día, más cerca de la Tierra está ubicado el astro, o sea, más pequeño es el radio de su órbita. Así es que la Luna se mueve sobre el círculo de radio menor; el Sol sobre un círculo de radio intermedio; las estrellas zodiacales sobre el círculo de radio mayor.

Si el observador está parado sobre la Tierra en el hemisferio sur con los brazos abiertos hacia los costados, el derecho apunta al Este, el izquierdo al Oeste. Todos los astros se mueven en el sentido contrario a las agujas del reloj. Vamos a suponer que los astros siempre se levantan en el Este y se ponen en el Oeste y que el Sol sale a las 6 de la mañana y se pone a las 6 de la tarde. Ésta es una gran simplificación, pero nos permite concentrarnos en los efectos más notorios. Así, por ejemplo, el Sol ubicado en el Oeste, a la izquierda del observador terrestre, significa que se está poniendo y que son las 6 de la tarde.

Si sabemos la posición del Sol en su recorrido, la Luna se ubicará según su fase, es decir, según el ángulo que forma con el Sol visto desde la Tierra. El actor que representa la Luna muestra su fase formando un círculo entero con los brazos en arco y en alto cuando está llena y modificando la forma del arco para exhibir las otras fases; así, por ejemplo, un brazo estirado y el otro arqueado formando una D o una ᗡ denotan un cuarto de luna.

La actividad consiste en resolver problemas representando las posiciones de los cuerpos celestes mediante los “cuerpos terrestres” de los integrantes de cada grupo. Hagan un diagrama para cada situación; lo usaremos en la discusión al final de la clase.

Veamos un ejemplo: si en el problema a resolver se determina que desde la Tierra se ve un cuarto de Luna a la puesta del Sol, el diagrama o la teatralización de esta situación sería así:

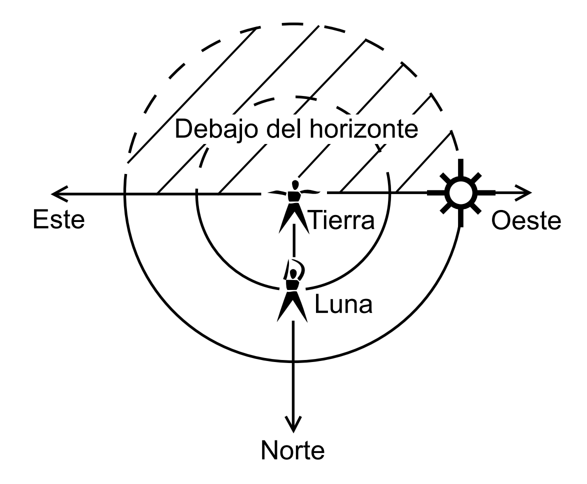


Figura 8.1.

Practiquen cómo se obtiene este diagrama, ubicándose de a uno a partir de los datos del problema. La Tierra se pone en el centro. Luego se ubica el Sol en su círculo, a la izquierda del observador terrestre, o sea, se ubica en el Oeste ya que se trata de representar la puesta del Sol.
Para que desde la Tierra se vea un cuarto de Luna, el ángulo Luna-Tierra- Sol debe ser de 90° (de esa manera la Luna muestra al observador terrestre sólo la mitad de su cara iluminada; tengan siempre en cuenta que el Sol ilumina sólo la mitad de la Luna que lo enfrenta y que la otra mitad queda oscura). Por lo tanto, cuando el Sol se está poniendo, la Luna debe ubicarse sobre el meridiano del observador. Y para que sea visible debe estar sobre el horizonte (y no debajo: el piso a las espaldas del observador terrestre representa la parte del cielo que está debajo del horizonte y por lo tanto no se ve). El actor que hace de Luna se ubica y muestra su fase: con los brazos en alto arquea el que está iluminado, del lado del Sol.
Sobre la base de este esquema se pueden hacer predicciones. Supongamos que la pregunta es si la Luna que se ve es creciente o menguante. Sabemos que al día siguiente la Luna va a estar más al Este durante la puesta del Sol. Para que les quede claro muevan al actor que hace de Luna más hacia el Este sobre su círculo. Cuando la Luna llegue al Este, el Sol iluminará toda la cara lunar que se ve desde la Tierra, y la Luna estará llena. Por lo tanto, la Luna del problema está acercándose a ser llena y estamos viendo un cuarto creciente.

Solución de los problemas usando el modelo geocéntrico

Problema 1. El observador terrestre ve la luna llena al amanecer. ¿Dónde está la Luna? ¿Sobre el horizonte Este u Oeste, o sobre el meridiano?

Solución al problema 1:

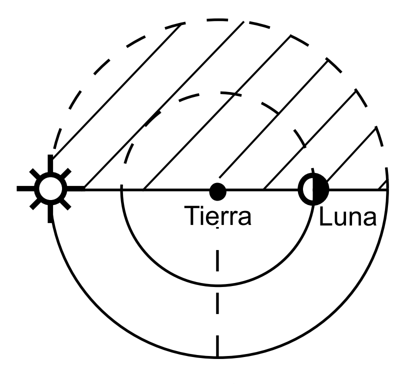


Figura 8.2.

Cuando hay luna llena, el ángulo Luna-Tierra-Sol es de 180°. De esa manera toda la cara de la Luna iluminada por el Sol enfrenta a la Tierra. Al amanecer, el Sol está en el Este y por lo tanto la Luna llena está en el Oeste, poniéndose.

Problema 2. El observador terrestre ve una luna menguante levantándose en el Este. ¿Qué hora es?

Solución al problema 2:

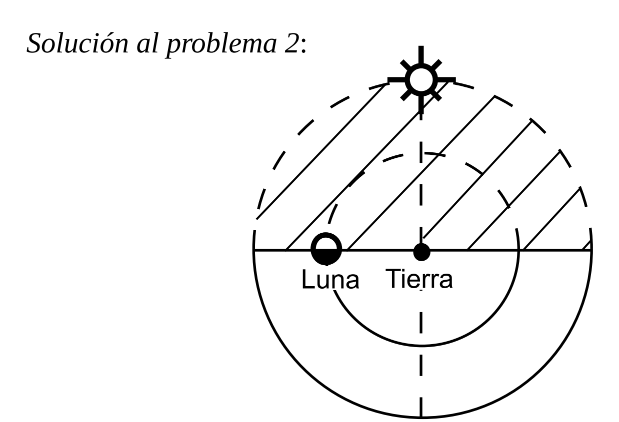


Figura 8.3.

Para resolver este problema, primero se ubica a la Luna en el Este, levantándose. Luego se piensa en qué posición debe estar el Sol para que desde la Tierra se vea un cuarto de Luna, y que ésta mengüe al día siguiente. Esto puede ser difícil de visualizar para los estudiantes. Podemos hacer un análisis con ellos partiendo de situaciones más sencillas de entender. La luna llena, situación descripta en el problema anterior, es más fácil de visualizar: se trata de una conformación en la que la Luna y el Sol se encuentran en direcciones opuestas respecto a la Tierra y, por lo tanto, cuando un astro sale, el otro se pone. Sabemos que el Sol se mueve más rápido que la Luna. También sabemos que el cuarto menguante viene siempre después de la luna llena. Por lo tanto, cuando la Luna esté en cuarto menguante, el Sol se le habrá adelantado. Cuando la luna llena sale, el Sol se está poniendo; cuando la luna menguante sale, por lo tanto, el Sol ya se habrá puesto hace rato, o sea, es de noche (en nuestro modelo, está a espaldas del observador parado en la Tierra, en la zona que representa al cielo debajo del horizonte). ¿Cuán de noche es? La antropomorfización nos muestra que para ver sólo una mitad del semicírculo iluminado, o sea un cuarto de Luna, el Sol tiene que estar en el punto exactamente opuesto al mediodía, es decir, la medianoche.

También se ve en el diagrama que la luna menguante se pone al mediodía. Por lo tanto, un cuarto de luna menguante sólo se ve de mañana (y nunca por la tarde).

Problema 3. El observador terrestre ve un eclipse de Sol. ¿Cuál es la fase de la Luna?

Solución al problema 3:

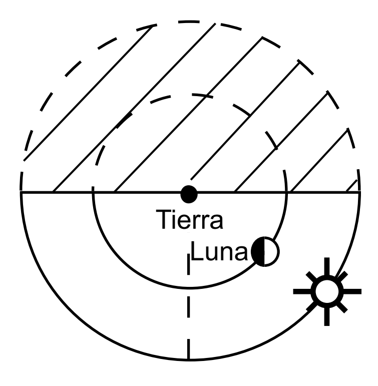


Figura 8.4.

Para eclipsar el Sol, la Luna ha de estar exactamente entre el Sol y la Tierra, o sea, será luna nueva, porque su cara iluminada queda exactamente "de espaldas" a la Tierra. Esto trae aparejada una cuestión intrigante: si cuando hay luna nueva, la Luna está entre el Sol y la Tierra, entonces ¿por qué no se produce un eclipse de Sol en cada luna nueva? La explicación reside en que el Sol, la Tierra y la Luna no están exactamente en el mismo plano, con lo cual decir que hay luna nueva no significa que la Luna esté tapando el sol, sino simplemente que la cara de la Luna que vemos no está iluminada. Es sabido que muchos alumnos confunden las fases de la Luna con los eclipses lunares.

Problema 4. La estrella "E" está en el meridiano a medianoche. ¿A qué hora estará "E" en el meridiano dos semanas más tarde?

Solución al problema 4:

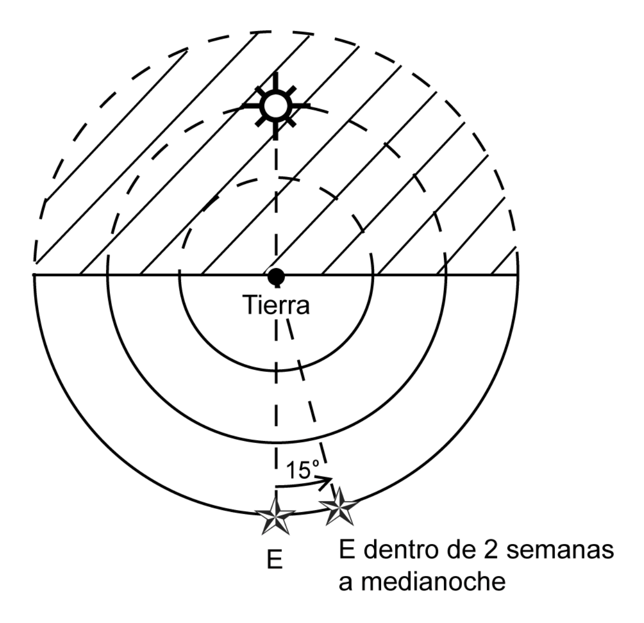


Figura 8.5.

En la figura 8.5, "E" es la estrella visible sobre el meridiano. A medianoche hay 180° entre el Sol y la estrella: el Sol está exactamente en la mitad de su camino entre Este y Oeste, del lado del cielo debajo del horizonte. Sabemos que

la estrella se adelanta al Sol 15° en dos semanas (1° por día). El ángulo Sol-estrella entonces es 15° mayor que 180°, y a medianoche la estrella ya habrá pasado por el meridiano. La estrella habrá estado en el meridiano a las 11 de la noche (sabemos que el Sol rezagado 15° corresponde a una hora antes de medianoche ya que recorre 360º –una circunferencia– en 24 horas, y 360º / 24 = 15º).

Problema 5. La estrella "E" está poniéndose al amanecer. ¿A qué hora se la podrá ver dentro de 9 meses?

Solución al problema 5:

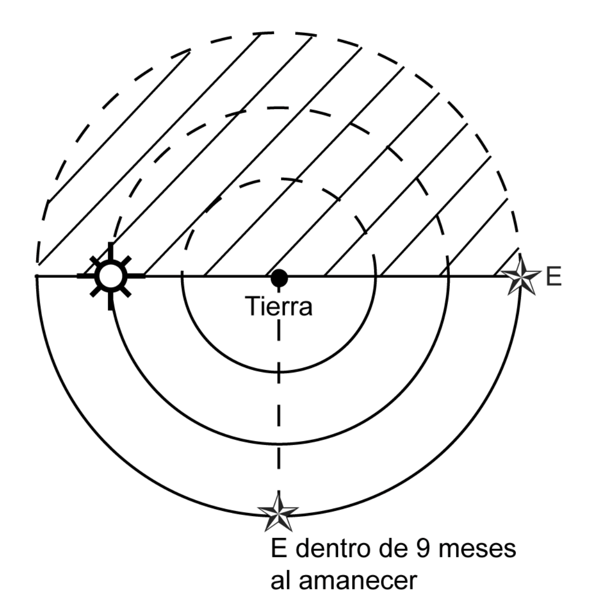


Figura 8.6.

En la figura 6, "E" es la estrella poniéndose; S es el Sol al amanecer. El ángulo entre la estrella y el Sol es 180°. En 9 meses la estrella se adelanta 270° al Sol (1º por día, por 270 días): así que el ángulo Sol-estrella es 90° y la estrella estará en el meridiano cuando amanezca.

De día la estrella no se ve porque la luz del Sol inunda el cielo; para verla hay que esperar a que se ponga el Sol. Como puede deducirse de la figura 6, cuando el Sol se pone la estrella está debajo de nuestro horizonte.

La estrella aparece a la medianoche, y se puede ver entre la medianoche y el amanecer.

ACTIVIDAD HELIOCÉNTRICA

La siguiente actividad consiste en recrear, en un sistema heliocéntrico, las geometrías de las cinco situaciones anteriores y contestar las mismas preguntas basándose en este sistema. El objetivo es reconocer que las respuestas son las mismas aunque es más complejo advertirlas. En este sistema es particularmente importante que todos los alumnos tengan la oportunidad de ser la Tierra.

A fin de maniobrar con un modelo heliocéntrico, los estudiantes formarán de nuevo grupos de cuatro personas. El Sol esta vez estará quieto en el centro. La Tierra rotará sobre su eje y alrededor del Sol. La Luna girará en torno a la Tierra. La estrella zodiacal estará quieta.

DIFICULTADES DE LOS ALUMNOS

Una dificultad que suele presentarse en estas actividades se relaciona con los movimientos relativos. Al hablar del movimiento de las estrellas que cada día se ponen más temprano, se vincula a las estrellas con el horizonte ("se ponen") y con el Sol ("más temprano"). Si luego se pregunta dónde estará la estrella cuando el Sol se ponga, esto vincula el movimiento del Sol con el horizonte. La posición de la estrella se sabe porque se conoce su movimiento relativo al Sol. Para evitar confusiones los estudiantes deben convencerse de que lo que se mantiene constante a lo largo de un día es el ángulo estrella-Tierra-Sol. Por lo tanto si saben qué hora es, pueden ubicar al Sol y la posición de la estrella queda determinada.

LA DISCUSIÓN

La discusión debe ser encaminada y moderada por el profesor. El docente pregunta a los distintos grupos cómo han contestado la pregunta. Se confrontan las soluciones que no coinciden y se analizan hasta llegar a un consenso. Si se estima útil, se pueden representar las respuestas en cuestión con un grupo que se sitúa al frente de la clase. De otro modo, la discusión de los resultados se puede hacer en una pizarra magnética con imanes que

se mueven en las órbitas astrales o con un tablero de felpa y astros de velcro o felpa.

Recalquemos: el objetivo de las actividades es mostrar la utilidad del modelo geocéntrico para resolver problemas cualitativos en forma simple e intuitiva. Nos hemos limitado a predecir los movimientos de la Luna, el Sol y las estrellas zodiacales, sin considerar para nada a los planetas. Históricamente lo que inclinó la balanza que equiparaba las virtudes de los dos modelos a favor de la causa heliocéntrica fue, justamente, el análisis de los movimientos de los planetas. Es posible y útil extender el abordaje antropomórfico que hemos descripto para visualizar el movimiento de los planetas en ambos sistemas y reconocer que, en este caso, la simplicidad está del lado del sistema heliocéntrico.

9

PARTÍCULAS CARGADAS: LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO

Existe una gran variedad de fenómenos extraños que muchos objetos exhiben al ser frotados: atraen pequeños trozos de papel, se atraen y repelen mutuamente, producen chispas que saltan por los aires y nos ponen los pelos de punta. Tales fenómenos, llamados "eléctricos", obedecen a ciertas reglas sencillas que hemos explorado en el capítulo 3. En este capítulo intensificaremos la exploración y examinaremos por qué se producen estos fenómenos y qué sucede dentro de los objetos que los exhiben. Para ello desarrollamos una guía de actividades que ayuda a los estudiantes a construir un modelo de la constitución interna de los objetos que da cuenta del comportamiento de los mismos cuando se los carga eléctricamente.

EFLUVIOS Y FLUIDOS: MODELOS DE ATRACCIÓN Y MODELOS DE TRANSMISIÓN

Cuando el inglés William Gilbert, a principios del siglo XVII, estudió con detalle las atracciones por frotamiento (es decir, las fuerzas eléctricas), descubrió que algunos objetos (como el vidrio, la cera, el ámbar y otras resinas) podían adquirir esta virtud y otros no (los metales). Las atracciones de los materiales eléctricos eran interacciones a distancia y Gilbert sostuvo que se debían a emanaciones de una especie de hebras invisibles a las

que llamó "efluvios". Muchos de los experimentos llevados a cabo en esa época buscaban establecer la naturaleza de estos efluvios (¿son sólidos o tenues?, ¿pueden atravesar materiales?). Nadie podía ver los efluvios: se trataba de una idea inventada para poder explicar lo que se veía, es decir, era un *modelo* de la atracción eléctrica. (Ideas parecidas habían sido propuestas para explicar la atracción gravitatoria.) Sin embargo, no existía ninguna manera de medir las características de los efluvios y la idea no parecía producir muchas predicciones útiles.

Stephen Gray (1666-1736), también en Inglaterra, inició una línea de indagación distinta, que resultó más fructífera. En vez de concentrarse en el mecanismo de acción de la atracción eléctrica, observó que ésta podía migrar de un objeto a otro y se preguntó cuán lejos podía llegar. Se dedicó a cargar objetos y luego a pasar la carga a otro mediante un "conector" que podía ser una barra de vidrio o de madera.[1] En un experimento colgó esas barras del techo de un granero con hilos de seda. El experimento funcionó varias veces hasta que los hilos se rompieron. Los cambió entonces por hilos de cobre, pensando que serían más resistentes al peso, pero el experimento dejó de funcionar. Al investigar este percance, Gray notó que algunos materiales transmitían la propiedad de atracción (los conductores) y otros no (los aislantes). Los buenos conductores no son fáciles de cargar: la lista de "eléctricos" de Gilbert está constituida por malos conductores.

El hecho de que la propiedad eléctrica pudiera migrar de un objeto al otro sugirió a los investigadores de la época que se trataba de un fluido eléctrico, una sustancia que se movía con mayor facilidad en algunos materiales (conductores) y con menor facilidad en otros (aislantes). Se comenzó a hablar entonces de "cargar" a un objeto de fluido eléctrico, y de ahí proviene la palabra "carga". Como los efluvios, la idea de este fluido es totalmente inventada a fin de visualizar lo que está ocurriendo. Se trata de un modelo teórico de la *transmisión* de la propiedad eléctrica.

Dufay descubrió posteriormente que existían dos tipos distintos de carga,[2] lo que permitió comenzar a visualizar la existencia de dos fluidos dis-

1. Si bien la madera es considerada un mal conductor, Gray trabajaba en un clima húmedo que aumentaba la conductividad de los objetos.

2. Véase el capítulo 3 para una exploración más detallada de las ideas de Dufay y la evidencia de dos tipos de cargas.

tintos en vez de uno solo: un fluido para cada tipo de carga. Esto condujo a la idea de que los objetos neutros contienen igual cantidad de cada tipo de fluido, cuyos efectos se cancelan dentro del objeto para producir un efecto neto nulo.

Esta idea de que un objeto contiene igual cantidad de los dos fluidos eléctricos fue fructífera. Aunada con la teoría atómica, que dice que todos los objetos están constituidos por átomos, uno de los corolarios de esta idea es que los átomos deben contener ambos fluidos en su interior. A partir de este razonamiento los científicos comienzan a hablar, no ya de fluidos, sino de partículas cargadas dentro de los átomos. Cuando los átomos pierden alguna de sus partículas constitutivas, los objetos que conforman adquieren una carga neta medible. El "fluido eléctrico" pasa entonces a visualizarse como la migración (de un objeto a otro o de una parte de un objeto a otra) de minúsculas partículas subatómicas dotadas de "carga", es decir, de propiedades eléctricas inherentes. A diferencia de los objetos macroscópicos, las partículas subatómicas estarían inherentemente cargadas (no pueden perder sus permanentes propiedades eléctricas). Finalmente, en el siglo XX, J. J. Thomson determinó que los rayos catódicos son haces de partículas cargadas negativamente, a las que llamó "electrones", moviéndose a grandes velocidades. Esto consolidó la idea de que en el interior de cada objeto material existen partículas cargadas eléctricamente. Nos centraremos en esta idea en el presente capítulo y exploraremos la construcción del modelo que originó.

SECUENCIA DIDÁCTICA: CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CARGA

El trabajo en esta secuencia de actividades se hará mediante una guía de preguntas escritas para los alumnos y también a través de la intervención del docente para orientar las discusiones. Los experimentos y las observaciones jugarán un rol importante, pero el papel principal lo tendrán las discusiones de ideas abstractas, y aquí el docente deberá mostrar su pericia como moderador y guía.

Los experimentos de cada una de las actividades pueden realizarse en clase o, si se carece de tiempo, pueden ser discutidos por el docente mediante dibujos en el pizarrón y explicaciones detalladas. En este caso el docente deberá ser cuidadoso y explicar los resultados de los experimentos sin revelar las características del modelo, dejando así espacio para que los estudiantes hagan sus propias interpretaciones.

El objetivo principal de esta secuencia didáctica es que, dado un conjunto de observaciones, los estudiantes comprendan cómo se construye un modelo teórico para explicarlas. Lo ideal es que los estudiantes participen activamente en la creación de este modelo pero, como se trata de un producto de la imaginación, no se puede pretender que los alumnos imaginen la idea adecuada en el momento adecuado. El docente deberá encontrar un equilibrio entre su propio protagonismo y el de sus estudiantes, para lograr que lleguen al resultado esperado y aprecien el rol de la creatividad en la formulación de este tipo de ideas.

LA HERRAMIENTA BÁSICA: EL ELECTROSCOPIO

La mayor parte de los experimentos propuestos o analizados en este capítulo se realizan usando un electroscopio. El electroscopio que vamos a usar (los hay de muchos tipos, muy diferentes) es muy sencillo, como muestra la figura 9.1. Consiste simplemente en un frasco con una tapa de material aislante (puede ser plástico). La tapa está perforada de tal manera que un alambre conductor (metal) cuelga en el interior del frasco pero está conectado con una bola de metal (que bien puede ser un pedazo de papel de aluminio abollado) en la parte exterior del frasco. El alambre dentro del frasco termina en forma de anzuelo y de él cuelgan dos tiritas de papel de aluminio.

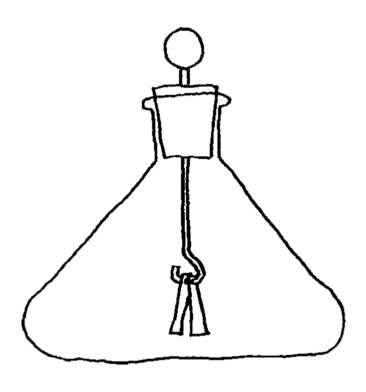


Figura 9.1.

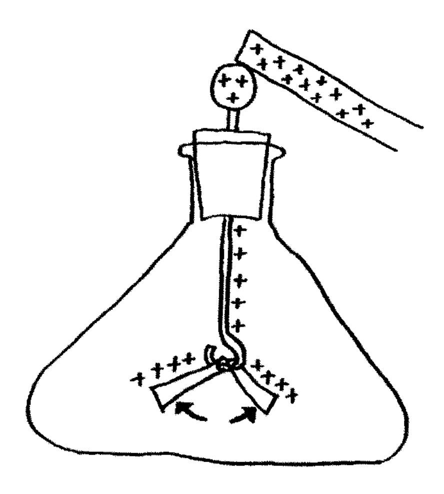


Figura 9.2.

Cuando un objeto cargado toca la bola metálica exterior, la carga migra por el alambre hacia las tiritas de aluminio. Estas hojuelas se cargan, entonces, con el mismo tipo de carga (proveniente del objeto que toca la bola) y tienden a separarse desafiando la gravedad (figura 9.2). El instrumento puede usarse para determinar la intensidad de la carga: mayor separación indica mayor carga. Pero no puede usarse para determinar el *tipo* de carga porque ambos tipos producirán el mismo efecto: la separación de las hojuelas. Éste es un punto que conviene recordar frecuentemente a los estudiantes.

Los electroscopios deben ser construidos y probados antes de realizar la actividad. Aunque parezca simple, su uso puede resultar trabajoso. En un primer intento el electroscopio puede no funcionar o funcionar mal. Por ejemplo, las hojuelas pueden separarse ante el contacto con un objeto cargado pero caer inmediatamente cuando se lo retira, a pesar de que en teoría las hojuelas deberían retener la carga otorgada hasta que otro objeto toque la bola metálica y le "robe" la carga. Generalmente la caída prematura de las hojuelas se debe a que el electroscopio cede la carga a objetos o sustancias (como el agua en el aire) en su entorno. Por lo tanto, habrá que verificar que los materiales utilizados sean buenos aislantes –a excepción de las hojuelas, el alambre y la bola metálica– y que el medioambiente no sea demasiado húmedo. Según nuestra experiencia, los experimentos aquí descriptos son repetibles si se seca previamente el exterior y (esto es muy importante) el *interior* del frasco con un secador para pelo.

ACTIVIDAD 1: OBSERVACIÓN DE LA CONDUCCIÓN DE LA CARGA

En esta actividad los estudiantes frotarán barras de acrílico y/o de vidrio sobre distintas telas y comprobarán, usando el electroscopio, que las barras estén cargadas. El objetivo principal de la actividad es llamar la atención de los estudiantes acerca del comportamiento de las hojuelas del electroscopio, que adquieren su carga indirectamente sin entrar en contacto directo con el objeto cargado. De esto se puede inferir que la carga debe haber migrado a través del alambre. Advertirán también que el frasco no está cargado (esto se comprueba mediante el uso de cintas –véase el capítulo 3– u otro electroscopio). De esta experiencia se concluye que ciertos materiales son buenos conductores y otros no. Durante esta actividad el docente puede describir los experimentos de Gray sobre la conducción de carga descriptos más arriba.

Guía de preguntas

El electroscopio y la conductividad

1. Un electroscopio es cualquier instrumento que puedas usar para determinar si un objeto está cargado o no y, hasta cierto punto, cuán intensamente cargado está. Tu profesor te proporcionará uno. Cargá por frotamiento una barra de acrílico o plástico y después usala para tocar el metal en la parte de arriba del electroscopio. ¿Qué sucede con las hojitas de papel de aluminio dentro del electroscopio? ¿Por qué, en tu opinión, sucede tal cosa?
2. Las hojitas de papel de aluminio, ¿fueron frotadas contra alguna otra superficie? ¿Están cargadas? Si están cargadas, ¿cuál es tu evidencia? ¿Cómo adquirieron su carga?
3. ¿Está cargado el vidrio del frasco? ¿Cómo podés estar seguro? ¿Cuál es tu evidencia?
4. ¿Qué sucede con las hojitas de papel de aluminio cuando la barra cargada ya no está tocando el electroscopio?

ACTIVIDAD 2: ¿QUÉ ES LO QUE FLUYE?

Ahora que los estudiantes saben que la carga puede desplazarse de un objeto a otro, el docente les propondrá que traten de imaginar qué

sucede dentro de esos objetos, qué puede ser lo que les otorga las propiedades eléctricas. En los siglos XVII y XVIII era muy razonable pensar que una propiedad se desplazaba a causa de un agente móvil, posiblemente de una sustancia que fluía. Si los estudiantes no pueden visualizar este mecanismo de acción, entonces el docente deberá proponerlo y preguntar si tiene sentido, si la idea es consistente con lo que sucede. Al mismo tiempo el docente deberá recalcar que no existe evidencia directa de la existencia de este fluido, sino que se trata de una idea que inventamos para poder visualizar qué es lo que sucede, y cuya utilidad pondremos a prueba en actividades por venir. Los estudiantes continuarán trabajando con la guía de preguntas que sigue. En todo momento estará abierta la posibilidad de repetir o modificar un experimento con la ayuda del electroscopio.

Guía de preguntas

¿Qué estará sucediendo dentro de los objetos?

En esta actividad vos y tu grupo van a contestar algunas preguntas. Inmediatamente después las respuestas van a ser discutidas por toda la clase.

1. “La carga eléctrica puede moverse de un objeto al otro”. ¿Es esto cierto? ¿Con qué evidencia contás para poder afirmarlo?
2. ¿Se mueven los dos tipos de carga (positiva y negativa) o sólo una? ¿Qué tipo de experimentos puede demostrar esto?
3. Tratá de imaginarte qué está pasando dentro de los objetos. ¿Por qué la propiedad eléctrica se mueve de un objeto al otro? ¿A qué se puede deber esta propiedad?
4. ¿Tenemos alguna evidencia directa de que esto que imaginamos existe?
5. Para pensar y debatir: supongamos que hay dos tipos de partículas extremadamente pequeñas: tipo “+” y tipo “-”, y que cuando un objeto contiene partículas de uno u otro tipo, adquiere lo que llamamos carga. ¿Qué propiedades tienen que tener estos dos tipos de partículas para poder explicar todos los fenómenos que observamos hasta ahora?

Comentario de la Actividad 2

La pregunta 3 de la guía ("qué está pasando dentro de los objetos") es la clave para la construcción del modelo. El docente buscará la forma de iniciar la discusión, usando esta pregunta como puntapié inicial para arribar a la noción de que una "cosa" produce las interacciones eléctricas. Como hay dos tipos de electricidad, deberemos postular dos tipos de "cosa", que se mueven dentro de los objetos.

En la pregunta 5 se sugiere que estas "cosas" son pequeñas partículas. Las partículas propuestas deben tener ciertas propiedades para ser compatibles con los fenómenos observados:

- Debe haber dos tipos de partículas microscópicas en el universo: positivas y negativas.
- Las partículas tienen que poder moverse en el interior de ciertos objetos, pero no de otros.
- Partículas del mismo tipo deben repelerse.
- Partículas de tipo diferente deben atraerse.

De la discusión planteada en la guía de preguntas puede deducirse que si dos objetos contienen partículas del mismo tipo se repelerán como consecuencia de que las partículas mismas se repelen. Es importante recalcar que no tenemos evidencia alguna de la existencia de estas partículas: simplemente las hemos inventado para nuestra conveniencia, porque es más fácil pensar el mundo de esta manera. Nótese que en este caso no hacemos referencia a la interacción de las partículas con los objetos no cargados. Esto no tiene por qué explicitarse a los estudiantes en este momento, pero será importante en las próximas dos actividades. Los cuatro principios enunciados como respuesta a la pregunta 5 constituyen el cuerpo central del modelo teórico de flujo de cargas. El próximo paso será conciliar esta visión de lo que sucede con diversos fenómenos eléctricos observables.

ACTIVIDAD 3: USO DEL MODELO PARA EXPLICAR FENÓMENOS

Esta actividad invita a los estudiantes a usar el modelo para darles sentido a los fenómenos básicos de la electrostática.

Guía de preguntas

¿Cómo se explican nuestras observaciones con el modelo?

1. ¿Cómo podés explicar, de acuerdo con el modelo elaborado en clase, el hecho de que dos objetos frotados de manera idéntica se repelen?
2. ¿Cómo podés explicar, de acuerdo con el modelo teórico elaborado en clase, el hecho de que dos objetos frotados de manera distinta a veces se atraen?
3. ¿Cómo podés explicar, de acuerdo con el modelo teórico elaborado en clase, el hecho de que un objeto cargado pierde la carga cuando toca a un objeto no cargado relativamente grande?
4. Para discutir entre toda la clase: hasta ahora hemos considerado las atracciones y repulsiones entre dos objetos, ambos cargados. Pero un objeto cargado –independientemente del tipo de carga– atrae un objeto que no está cargado (un objeto neutro). ¿Cómo podemos explicar este fenómeno usando nuestra idea de las partículas cargadas?

Comentario de la Actividad 3

Las primeras dos preguntas de la guía son más bien introductorias, mientras que la tercera es más rica para la discusión. Los estudiantes pueden entender perfectamente que los objetos ganan o pierden carga porque las partículas se mueven de un objeto a otro. Pero aquí es interesante que el docente introduzca la siguiente pregunta: ¿por qué abandonan las partículas el objeto en el que están? ¿Por qué no se quedan ahí?

Nuestro modelo teórico nos ofrece una respuesta. Un objeto cargado tiene un exceso de un tipo de partícula. Partículas del mismo tipo se repelen, y por eso buscarán estar lo más lejos posible las unas de las otras. En cuanto les ofrezcamos un medio por donde esparcirse y alejarse las unas de las otras, la fuerza de repulsión entre ellas las hará migrar.

La cuarta pregunta es la más importante de esta actividad: ¿por qué los objetos cargados atraen a cualquier objeto neutro? Probablemente la mayor parte de los alumnos no puedan imaginar una respuesta por sí mismos, pero según nuestra experiencia en una clase suele haber al menos un estudiante

que sí puede y por ello una discusión guiada con la participación de toda la clase puede ser la forma más rica de abordar esta cuestión. La respuesta –que los objetos neutros contienen igual número de partículas de ambos tipos– es uno de los aspectos más ricos del modelo, como veremos más abajo. Una versión más completa de la respuesta podría ser la siguiente: "Los objetos que no están cargados contienen ambos tipos de partículas finamente mezcladas. Si las partículas de tipos diferentes están presentes en cantidades iguales, sus efectos se cancelarán mutuamente y el resultado final será nulo. Un objeto cargado atrae las partículas de tipo diferente que están presentes en el objeto no cargado".

ACTIVIDAD 4: USO DEL MODELO PARA PREDECIR FENÓMENOS

Como hemos mencionado, los modelos crecen y se refinan con el tiempo. En la actividad anterior el modelo de flujo de carga dio un giro con la propuesta de que los objetos neutros poseen en su interior ambos tipos de cargas. Este refinamiento es especialmente fructífero porque nos permite hacer ciertas predicciones acerca del comportamiento eléctrico de los objetos.

Guía de preguntas

Pensando a partir del modelo

En la actividad anterior concluimos que sería interesante pensar que los objetos neutros poseen cantidades iguales de los dos tipos de partículas y que, por lo tanto, se cancelan mutuamente. En esta actividad exploraremos algunas de las consecuencias de esta idea.

1. Los objetos son cargados por frotamiento con otro objeto. ¿De dónde viene esa carga? ¿Qué pensás que sucede cuando un objeto es cargado por frotamiento?
2. Cada vez que cargamos un objeto por frotamiento, lo estamos frotando contra un segundo objeto. De acuerdo con nuestro modelo, ¿qué deberá suceder con este segundo objeto? ¿Adquirirá carga también o no? ¿Si adquiere carga, será esta carga del mismo tipo o de un tipo distinto de la del primer objeto? Argumentá cuidadosamente tu razonamiento.
3. ¿Es posible poner a prueba las ideas expuestas en la pregunta anterior? Describí cuidadosamente experimentos que puedan

ayudarte en este sentido. No te olvides de describir los materiales y procedimientos que usarías y cómo los posibles resultados apoyarán tu línea de argumento.

4. Al explicar por qué los objetos neutros son atraídos por objetos cargados, propusimos que los objetos cargados atraen a las partículas cargadas presentes en los objetos neutros. Si esto es verdad, un extremo del objeto neutro deberá estar enriquecido en un tipo de partículas y el otro extremo en el otro tipo. Explicá por qué y qué tipos de partículas encontrarías en cada extremo, usando dibujos si es necesario.
5. ¿Qué pasaría, de acuerdo con estas ideas, si acercaras –¡pero sin tocar!– un objeto cargado a la parte metálica exterior de un electroscopio? ¿Qué verías en las hojuelas?
6. ¿Qué sucedería si alejaras el objeto cargado: se mantendrían separadas las hojuelas o no? ¿Por qué?
7. Tus respuestas a las preguntas 5 y 6 no son otra cosa que predicciones formuladas sobre la base del modelo que hemos elaborado. ¿Se cumplen esas predicciones? Probalo usando un electroscopio.
8. Todas estas discusiones han servido para elaborar un poco más el modelo de carga eléctrica. Escribí un resumen de las ideas principales dentro de este modelo.

Comentario de la Actividad 4

El modelo de objetos neutros arroja luz acerca del mecanismo por el cual los objetos adquieren su carga originalmente. De acuerdo con nuestro modelo los objetos neutros contienen ambos tipos de carga en cantidades iguales. Al frotar dos objetos neutros, uno de ellos “arranca” del otro algunas cargas de un tipo; esto crea un desequilibrio en ambos objetos: en uno porque adquirió carga de un tipo y en el otro porque la perdió. Pero, si esto es así, los dos objetos deberán estar cargados con igual intensidad pero con tipos de carga distintos. En efecto, esto es lo que sucede. Esta observación fue realizada por Benjamin Franklin. Uno de sus corolarios es que la carga total no puede ser creada ni destruida, aseveración conocida como “ley de la conservación de la carga”. Estos experimentos deberán ser discutidos en clase pero no aconsejamos realizarlos en la presente secuencia.

¿Cómo se explica, exactamente, que la presencia de partículas cargadas en un objeto neutro provoca o permite que éste sea atraído por un objeto

cargado? Es posible imaginar que cuando un objeto cargado está cerca de un objeto neutro atrae las partículas de carga distinta dentro del objeto neutro. Como las partículas de este tipo de carga se agolpan en uno de los extremos del objeto neutro, éste adquiere una carga en uno de sus extremos y la contraria en el otro extremo (por ausencia de las partículas que se movieron). Esto quiere decir que un objeto cargado induce en los objetos a su alrededor una redistribución de la carga y la creación de dos "polos", uno positivo y otro negativo. Esta forma de interpretar las cosas a través de nuestro modelo puede ser puesta a prueba mediante el uso del electroscopio.

Supongamos, por ejemplo, que acercamos un objeto cargado al electroscopio, pero sin tocarlo. El objeto cargado atraerá cargas distintas a la suya hacia el extremo superior del electroscopio (véase la figura 9.3). Estas cargas habrán migrado desde el extremo opuesto (el de las hojuelas), donde, por lo tanto, queda un exceso de cargas del otro tipo; es decir, las hojuelas quedarán cargadas (con el mismo tipo de carga que el objeto que se acerca al electroscopio). Si esto es así, las hojuelas deberán separarse aun cuando el objeto cargado no haya tocado al electroscopio, como muestra la figura 3. Siempre que no haya un contacto físico que permita el pasaje de cargas entre el electroscopio y el objeto, las hojuelas deberán caer a su posición original una vez que el objeto cargado se aleje del electroscopio. Esta predicción del modelo teórico, entonces, se puede comprobar y los estudiantes deberán hacerlo con sus electroscopios. La predicción se cumple.

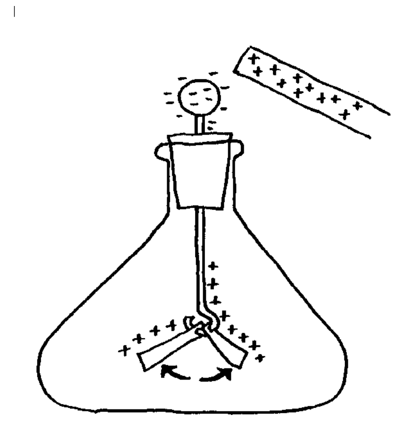


Figura 9.3.

El resumen propuesto en el punto 8 es una buena manera de cerrar el tema. Se trata de enunciar los componentes principales del modelo elaborado. El docente puede escribirlos en el pizarrón con la ayuda y participación de los estudiantes.

- Existen dos tipos de partículas en el universo; se las denomina positivas (o de signo +) y negativas (o de signo -).
- Partículas de tipos distintos se atraen; partículas del mismo tipo se repelen.
- Las partículas no pueden ser creadas ni destruidas, pero pueden migrar de un objeto al otro; algunos objetos permiten su paso más fácilmente que otros.
- Todos los objetos contienen partículas de los dos tipos en su interior: los objetos no cargados (neutros) tienen un balance de los dos tipos, mientras que los objetos cargados tienen un exceso de uno de los dos tipos de partículas.
- Cuando se frotan dos objetos entre sí, pueden intercambiar un tipo de partícula.

ACTIVIDAD 5: PRÁCTICA Y REPASO

Finalmente, cimentaremos algunas de las ideas con ejercicios. Incluimos aquí algunas preguntas que ayudarán a profundizar no sólo la reflexión sobre la idea de carga sino también sobre el rol de las ideas inventadas en los modelos teóricos y en la ciencia en general.

Ejercicio

---

a: Observaciones e ideas inventadas

En cada caso, determiná si la frase se refiere a un hecho o fenómeno que puede ser observado o si se refiere a una inferencia a partir de esas observaciones o a una idea teórica inventada para darle sentido a alguna observación. Si considerás que se trata de una observación, completá el casillero con una “o”; si se trata de una idea inventada o inferencia, completalo con una “i”.

A. Cuando se frotan objetos de vidrio o plástico contra la piel de un animal, pueden atraer pequeños pedazos de papel y otros objetos livianos. ☐

B. Partículas cargadas del mismo signo se repelen, mientras que partículas cargadas de signo diferente se atraen. ☐

C. Objetos del mismo material, frotados de manera idéntica (contra la misma superficie o sustancia), siempre se repelen. ☐

D. Objetos del mismo material frotados de manera diferente (contra superficies o sustancias diferentes) pueden atraerse mutuamente. ☐

E. Las partículas cargadas no pueden ser creadas ni destruidas, pero sus efectos se cancelan. ☐

F. Los objetos pueden adquirir el poder de atraer otros objetos por contacto con objetos que ya tienen ese poder. ☐

G. Todos los objetos tienen partículas cargadas en su interior; los objetos neutrales tienen partículas de signo diferente en perfecto equilibrio. ☐

H. Los objetos que adquieren el poder de atracción por frotamiento pueden perder ese poder por contacto con otros objetos. ☐

I. Las cargas eléctricas pueden fluir de un objeto al otro. ☐

J. Cuando un objeto que ha sido frotado (y que puede atraer otros objetos) es colocado cerca de un electroscopio, las hojitas de aluminio se repelen incluso si el objeto no está en contacto con el electroscopio. ☐

K. Si dos objetos se frotan uno contra otro y uno de ellos adquiere la capacidad de atracción, entonces el otro objeto también la adquirirá, y los dos objetos se atraerán mutuamente. ☐

L. La cercanía de un objeto cargado causa una distribución asimétrica de cargas en el interior de un objeto eléctricamente neutro. ☐

Ejercicio

---

b: Problemas

1. Imaginate que alguien te da un objeto (una regla, un globo). ¿Cómo podrías hacer para determinar si el objeto está cargado eléctricamente o no?
2. Imaginate que alguien te da dos objetos cargados. ¿Cómo harías para determinar si poseen el mismo tipo de carga o cargas de tipo diferente?
3. Suponé que te dan un objeto eléctricamente cargado. ¿Cómo podrías hacer para determinar si la carga es positiva o negativa?
4. Los siguientes experimentos son para que los realices en tu casa, usando cinta adhesiva[3] e imanes: a) ¿Qué pasa cuando acercás una cinta cargada a un imán?; b) ¿Pasa algo diferente si invertís el imán?; c) ¿Pasa algo distinto si invertís la cinta?; d) ¿Es posible hacer que un imán repela a una cinta?; e) ¿Hay una reacción distinta con imanes si la cinta es superior o inferior?; f) Escribí, basado en tus experimentos, cómo podrías hacer para determinar si un objeto desconocido es un imán o no usando solamente cintas adhesivas cargadas.
5. Considerá los siguientes experimentos. Un objeto A (por ejemplo, un globo) es atraído por una barra de plástico. Cuando el globo toca la parte metálica exterior de un electroscopio, las hojitas de papel de aluminio se separan. Un objeto B (digamos, una regla de plástico) toca la parte metálica exterior de otro electroscopio y las hojitas también se separan. Ahora colocás el objeto B cerca del electroscopio que estaba en contacto con A (pero sin tocarlo). Las hojitas, que estaban todavía separadas, caen juntas; cuando el objeto B se aleja del electroscopio, las hojitas vuelven a separarse.
6. Para cada una de las siguientes afirmaciones, especificá: 1) si la afirmación es verdadera, falsa o si la información provista es insuficiente para decidir; 2) en qué forma la evidencia en el texto sostiene (o refuta) la afirmación, o qué tipo de información impide determinar la veracidad de la misma:

3. Véanse experimentos con cintas cargadas en el capítulo 3.

a) El objeto A está eléctricamente cargado.
b) El objeto A está cargado negativamente (y es por eso que las hojitas se separan).
c) El objeto A está cargado positivamente (y es por eso que las hojitas se separan).
d) El objeto B es neutro.
e) Los objetos A y B tienen cargas diferentes.
f) Los objetos A y B deberían repelerse.

CONCLUSIÓN

El objetivo de esta secuencia didáctica es desarrollar algunos conceptos abstractos acerca de la idea de carga electrostática. La guía hace uso de observaciones directas y de experimentos (y en este sentido puede decirse que responde al aspecto empírico de la ciencia también), pero las actividades centrales van más allá de los fenómenos observables. La idea de carga como un fluido o como la expresión de partículas móviles no se deriva directamente de los fenómenos electrostáticos. Es inventada ingeniosamente para explicarlos y es por lo tanto consistente con las observaciones. Como hemos comentado, es una falacia afirmar que el conocimiento científico se desprende lógicamente de las observaciones que hacemos. Existe un elemento de creatividad e invención que va más allá de los datos empíricos.

Esta característica básica de los modelos teóricos –el hecho de que tienen elementos que son fruto de la creación imaginativa– determina en gran parte la forma de enfoque que se le debe dar al tema en el aula. En primer lugar, los estudiantes deberán estar familiarizados con los fenómenos básicos; de lo contrario toda la idea de cargas y partículas cargadas en movimiento resultará oscura para ellos. Es por lo tanto conveniente realizar las actividades propuestas en esta guía después de haber realizado las actividades descriptas en el capítulo 3 de este libro. Finalmente, al experimentar y apreciar el carácter inventado de las ideas del modelo (y asimismo cómo estas ideas cambian y se desarrollan) los estudiantes tendrán la oportunidad de enfrentarse con la riqueza de la idea abstracta de carga y de partícula cargada, y con los mecanismos por los cuales los investigadores construyen el conocimiento científico.

Cuarta Parte

El aspecto social de la ciencia

10

ACUERDOS, DEBATES E INFLUENCIAS

En su libro *Uncommon Sense*, el físico Alan Cromer describe a la ciencia como una extensión de la retórica, es decir, como una actividad en la cual se utilizan debates para persuadir a otros (Cromer, 1993). Según Cromer, en ciencia el tema a debatir es algún aspecto de la realidad, y las conclusiones (esas "verdades" que calificamos de científicas) no son sino el consenso de la comunidad de "debatidores". Cromer basa muchas de sus ideas en las del físico John Ziman, quien define a la ciencia como "el consenso de opinión racional entre investigadores competentes" (Ziman, 1968). En este sentido, la ciencia es una construcción social y es éste el aspecto que discutiremos a continuación.

El aspecto social de la ciencia vuelve a subrayar cuán opuesta es la ciencia a la verdad revelada. En la ciencia se necesitan datos empíricos que sustenten o validen lo que decimos, y que deben ser verificables por otros. Además, las interpretaciones y conclusiones que se sacan de esos datos pueden ser aceptadas o refutadas por otros investigadores. En otras palabras, para ser científicamente válido, el conocimiento tiene que poder ser verificado o refutado por cualquier otro científico. No hay lugar en la ciencia para el conocimiento personal basado en experiencias intransferibles, como es el caso, por ejemplo, de la religión o el arte. Dicho de otro modo, si lo que decimos o descubrimos no es verificable (por repetición de nuestros experimentos o nuestras observaciones) entonces cae fuera del ámbito

de la ciencia. El conocimiento científico es, por lo tanto, un conocimiento público.

EL CONSENSO EN LA INVESTIGACIÓN PROFESIONAL

Pocos alumnos de la escuela media conocen la dinámica de trabajo de los equipos de investigación, como por ejemplo el hecho de que habitualmente los grupos tienen una reunión semanal en la que participan todos sus miembros: desde el investigador principal o "jefe" hasta los estudiantes que comienzan a dar los primeros pasos en investigación, pasando por varias categorías de científicos. En estas reuniones, uno de los miembros del equipo presenta oralmente sus resultados e ideas mostrando con claridad los resultados obtenidos en cada experimento y cómo se analizaron y se sacaron las conclusiones. Los colegas, entonces, proponen nuevas rutas de abordaje cuando los experimentos no salen, tratan de participar en la construcción de modelos explicativos, alertan sobre temas relacionados que aparecen en la literatura específica (por ejemplo, si otros científicos en el mundo han investigado esas ideas o hecho experimentos similares, si alguien encontró un resultado opuesto, si hay otras técnicas posibles que se pueden usar para abordar la misma pregunta, etc.). Más que nada, en las reuniones de grupo se desmenuza la presentación de un trabajo y se buscan posibles fallas en los procedimientos, argumentos y razonamientos con el fin de mejorarlo. En el proceso del trabajo cotidiano del grupo se va logrando consenso.

Francis Crick, quien junto a Watson determinó en 1953 la estructura tridimensional del ADN, dijo en una ocasión que el alma de la colaboración científica es "el perfecto candor, y la rudeza si es necesaria". Un buen científico, afirmó, valora la crítica casi tanto como la amistad. Es más: según Crick, en ciencia la crítica *es* la medida de la amistad (citado en Judson, 1996). Por supuesto, la visión de Crick se aplica a toda discusión racional donde lo que importa son las evidencias y no las cuestiones personales.

LA CIENCIA PÚBLICA Y LA VALIDEZ DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

Más allá del consenso interno (dentro de los equipos de investigación) que produce hipótesis de trabajo útiles al grupo, existe otro tipo de consenso entre los científicos: el general o público, que valida socialmente el conocimiento científico y produce lo que llamaremos ciencia institucio-

nalizada. Este consenso más amplio involucra a la comunidad científica internacional.

El consenso general entre científicos se establece a través de numerosas vías de comunicación. En los albores de la ciencia moderna, los científicos se comunicaban únicamente por carta o a través de visitas personales. Hay ejemplos de correspondencias, como la de Faraday (James, 1991), que dan una idea clara de este tipo de intercambio. Recién en el siglo XIX aparecieron las sociedades científicas, uno de cuyos objetivos era establecer quién tenía prioridad en los descubrimientos. Estas sociedades comenzaron a publicar las primeras revistas científicas y a organizar congresos (Boorstin, 1986). Actualmente existe una enorme cantidad de publicaciones (en papel y digitales), encuentros y simposios, y los investigadores intercambian ideas por teléfono y correo electrónico. Las revistas científicas informan a la comunidad de investigadores cuáles son los últimos descubrimientos en diferentes áreas y esto (junto con los congresos y otros múltiples intercambios de ideas y resultados) va construyendo un consenso sobre cuáles son las cosas que la comunidad científica "sabe" o acepta.

El sistema de comunicación científica clásico en nuestros tiempos es el *paper* publicado en una revista especializada (la palabra castellana es "artículo", pero muchos científicos de habla hispana usan el término inglés). Estas revistas son publicadas en forma semanal, mensual o bimensual y reúnen artículos de diversos temas. Algunas revistas son de interés general (como *Science* o *Nature*) y otras son muy específicas (como *Neuron* o *Physical Review*). El cuerpo principal de estas publicaciones son artículos enviados por grupos de investigación en los que se presentan nuevos descubrimientos o ideas y se detallan los métodos utilizados y la evidencia que los respalda. Además las revistas tienen comentarios, cartas de lectores y otras secciones que hacen a la vitalidad de la comunidad científica. Los artículos, sin embargo, deben atravesar por un riguroso examen antes de ser aceptados para su publicación. Primero, el equipo científico manda el artículo a la revista. Los editores, entonces, envían copias del artículo a tres o cuatro expertos en el área, que deben permanecer anónimos. Estos árbitros analizan el trabajo y emiten su opinión, normalmente cuestionando el alcance de las conclusiones o los métodos experimentales. A veces sugieren hacer nuevos experimentos o repetir otros. En ocasiones, alguno de los árbitros vota en contra de la publicación, sea porque considera que tiene errores metodológicos graves o porque opina que los descubrimientos presentados no tienen la relevancia esperada por la revista. El *paper* es entonces devuelto para su corrección, y el procedimiento se repite hasta que todos los árbitros están satisfechos –en

cuyo caso el artículo es publicado– o no están satisfechos –y los autores deben buscar otra revista en donde publicar–. También puede pasar que existan errores en el trabajo que ni aun los árbitros logran detectar. Ha ocurrido que otros laboratorios hallaron fallas en trabajos ya publicados y las revistas tuvieron que retractarse de los resultados.

Recalcamos que en todo este proceso los árbitros son parte de la comunidad científica, generalmente investigadores que trabajan en campos relacionados con el del artículo que deben analizar. Es decir que, para poder publicar, un grupo de investigación debe convencer de la relevancia de sus resultados a un grupo desconocido de colegas. Este sistema de validación social rara vez se discute en el aula y sin embargo las revistas, con sus sistemas de referato, son los jueces del conocimiento científico.

Se usan variaciones del mismo sistema de referato para la asignación de fondos destinados a la investigación, sean públicos o privados. Esto significa que las investigaciones que se subsidian, o sea, los problemas que se investigan (ya que las investigaciones cuestan dinero y la asignación de fondos es crucial para que un tema se investigue o no), también dependen de la opinión de otros colegas. Comprobamos, entonces, que es la propia comunidad científica –en interacción con las fuerzas públicas y económicas locales e internacionales que influyen en la elección de áreas prioritarias de investigación y en la asignación de fondos para ellas– la que toma las decisiones de su rumbo, con todos los aspectos positivos de un sistema que se autorregula y los aspectos negativos de las ineludibles falencias e intereses de los seres humanos, las rivalidades, enfrentamientos y “trenzas” políticas.

La construcción social del conocimiento científico, tal como la estamos describiendo, se basa en el consenso de una multiplicidad de científicos que trabajan en distintos países, con diversas ideologías y puntos de vista, que tratan de encontrar los errores ajenos y, eventualmente, recomiendan soluciones para los problemas que encuentran. Ésta es, en definitiva, una forma muy rigurosa (aunque no infalible) de formular descripciones ajustadas de la realidad.

CIENCIA Y SOCIEDAD

Como toda actividad social, la ciencia refleja inevitablemente valores e intereses. Como sostienen los investigadores Rutherford y Ahlgren (1990), la dirección en que avanza la ciencia se ve afectada por influencias que tienen que ver con la cultura de la propia comunidad científica, como cuáles

son las preguntas más relevantes para investigar o los métodos más adecuados para hacerlo. En esto influyen también intereses económicos y valores culturales. La comunidad científica, para realizar sus investigaciones, depende de subvenciones de gobiernos y empresas que, con frecuencia, tienen profunda influencia en determinar qué problemas se deben investigar (por ejemplo, parte del dinero dedicado a la investigación se utiliza en desarrollar armas y tecnología de guerra).

La influencia de fuerzas sociales en la actividad científica se puede ilustrar con casos históricos. Veamos, por ejemplo, el caso de la refracción de la luz (el cambio de dirección observable cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro). Este fenómeno es atribuible a un cambio de velocidad de la luz cuando ésta pasa, por ejemplo, del aire al vidrio. En el siglo XVII coexistían dos modelos diferentes para explicar el fenómeno observado. Según Newton, la luz consistía en partículas que se movían como bolas de billar; con este modelo, la predicción era que las partículas *aumentaban* su velocidad al entrar al vidrio. Según Huyghens, un físico holandés, la luz era una vibración, una onda; la predicción con este modelo era que la onda *disminuía* su velocidad al entrar al agua. En esa época no era posible decidir entre los dos modelos porque no se tenían las herramientas necesarias para medir los cambios en la velocidad de la luz en diferentes medios. Pero era tan grande el prestigio de Newton que su modelo de la luz como corpúsculos gozó de consenso en la comunidad científica durante más de cien años, hasta que los experimentos de Young acerca de los fenómenos de interferencia y difracción revivieron la teoría de la luz como onda. Recién en 1850, cuando Foucault y Fizeau midieron la velocidad de la luz en el agua y encontraron un valor menor que en el aire, se descartó en forma definitiva la teoría de Newton. Como muestra este ejemplo, la presión social ocasionada por el prestigio de quien proponía la teoría determinó durante más de un siglo su aceptación por parte de la comunidad científica.

Otro ejemplo de la gran influencia de las ideas de un personaje de prestigio es la perduración del modelo ptolemaico (geocéntrico) de nuestro sistema planetario y la larga lucha por la aceptación del modelo heliocéntrico. El personaje influyente en este caso es Aristóteles, cuyas ideas primaron durante más de mil años. La noción aristotélica de una Tierra inmóvil en el centro del sistema planetario fue retomada por la Iglesia, la cual, como sabemos, le hizo la vida muy difícil a Galileo y recién en el siglo XIX aceptó oficialmente que la Tierra se mueve alrededor del Sol.

El modelo geológico de la deriva continental es otro ejemplo en que el consenso de la comunidad científica hizo caso omiso de una hipótesis importante presentada con buena evidencia. El geólogo alemán Wegener pro-

puso a comienzos del siglo XX que el encaje geográfico de América y África, y la similitud de su flora y fauna fósil, eran evidencias de la deriva continental de ambas masas terrestres. Pero ya existía otra explicación de la similitud entre los fósiles en los dos continentes, que postulaba la existencia de antiguos puentes naturales que, con el tiempo, se desmoronaron dentro de los océanos. El encaje aparente de las formas de las costas este de América del Sur y oeste de África, entonces, fue dejado a un lado y tuvieron que pasar cincuenta años y producirse nueva evidencia (con técnicas que estudian el magnetismo de las rocas) para que una nueva generación de geólogos debatiera y aceptara la teoría de Wegener, ahora establecida.

En estos ejemplos está claro que el clima intelectual del momento y las influencias personales afectan poderosamente la aceptación o el rechazo de teorías.También existe una estrecha relación entre la ciencia (qué se investiga y cómo) y los tiempos históricos y sus fuerzas culturales, políticas y filosóficas. Por ejemplo, la emergencia de la burguesía y el capitalismo condujo a la formulación de importantes ideas sobre la dinámica social, como las de Malthus y de Adam Smith acerca de la relación entre las poblaciones humanas y los recursos que éstas usufructúan. Las ideas de ambos pensadores fueron determinantes directos en la forma de ver la naturaleza por parte de Charles Darwin. Como señaló Stephen J. Gould (1997), la "lucha por la existencia" de Darwin es una aplicación a las poblaciones animales y vegetales de las ideas de Adam Smith sobre competencia capitalista. Las ideas de Darwin acerca de la selección natural a su vez inspiraron una serie de corrientes filosóficas en las ciencias sociales apodadas "darwinismo social". Vemos este tipo de influencia también en la revolución industrial, fruto de la máquina de vapor, que estimuló el estudio de la termodinámica. Y tambien en los estudios de la trayectoria de proyectiles, que realizó el mismo Galileo, guiado por intereses económicos y militares. En el mismo sentido, las investigaciones en telecomunicaciones derivadas de la Segunda Guerra Mundial dieron pie a una "teoría de la comunicación" que incluso se adaptó al estudio de la comunicación animal y a las señales producidas por las neuronas.

Las ideas en boga en una determinada época pueden abrir puertas o cerrarlas, pueden ser inspiradoras como en el caso de Darwin, que retomó las ideas de Adam Smith, o pueden cegar a los investigadores y conducirlos a practicar mala ciencia. Gould ha mostrado con elocuencia cómo la discriminación racial y sexual condujo a elaborar teorías "científicas" sobre la supremacía intelectual de ciertos grupos. Las falacias "biologicistas" sobre

la medición de la inteligencia están lúcidamente expuestas en su libro *La falsa medida del hombre* (Gould, 2003) y en numerosos ensayos.

LA CONSTRUCCIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EL DEBATE DE IDEAS CIENTÍFICAS

Para llevar al aula el mecanismo de construcción social de las ideas científicas debemos construir el hábito de la discusión fundamentada (es decir, basada en evidencias concretas que den sustento a cada argumento) ante un experimento o un fenómeno. En este sentido, debemos fomentar el disenso entre los estudiantes, pero también proveer las herramientas para construir consenso. El trabajo en equipos, las presentaciones orales, la crítica entre pares, las mesas redondas o "congresos" entre estudiantes son todas formas de generar instancias de debate y consenso que podemos utilizar en la clase.

El mecanismo social de la construcción de las ideas científicas está estrechamente relacionado con la perspectiva del constructivismo sociocultural (basada fundamentalmente en las ideas del psicólogo ruso Lev Vigotsky). El constructivismo sociocultural plantea que todo aprendizaje se da mediante la interacción entre personas que se involucran en un discurso compartido. El lenguaje tiene, por lo tanto, un rol fundamental como mediador en la construcción del conocimiento.

Desde este punto de vista, la comprensión de los fenómenos científicos se construye a medida que los alumnos se involucran en conversaciones en las que debaten sus ideas acerca de lo que ven o creen que sucede. En este tipo de trabajo el docente tiene múltiples roles: es guía, moderador del debate, e incluso es parte de la comunidad de aprendizaje que se forma en el aula. Tiene la función de sugerir ejemplos y modelar las preguntas y explicaciones válidas en una investigación, guiar a los alumnos para buscar información o diseñar experimentos, ayudarlos a presentar sus ideas frente al resto de la clase y proponerles críticas para mejorarlas.

El diálogo socrático[1] es una herramienta fundamental para la discusión de ideas científicas con los alumnos, pues permite al docente esta-

1. Se le atribuye a Sócrates la técnica de enseñar mediante la formulación de preguntas. Por ello se dice que una técnica educativa es "socrática" cuando el docente induce la aparición o el desarrollo del conocimiento mediante preguntas, en lugar de explicitar dichos conocimientos al alumno.

blecer modelos de discusiones con fuerte consistencia lógica basados en la experiencia compartida (utilizando resultados de experimentos, observaciones que se hayan hecho en clase, etc.). El diálogo socrático es la conversación en la cual el docente guía cuidadosamente al alumno por medio de ingeniosas preguntas que promueven las reflexiones y comprensiones buscadas. Se entiende entonces que una pregunta es socrática cuando no busca una respuesta previamente aprendida, como las preguntas tradicionales de un examen, sino precisamente esas respuestas que sirven para desarrollar las ideas. Así es que en estos diálogos, el docente debe deliberadamente pedir explicaciones y evidencias de las afirmaciones que hacen los estudiantes (por ejemplo, "¿Por qué decís que las personas necesitamos oxígeno para vivir?" o "¿Qué te hace pensar que lo que hay en ese recipiente es agua?"), de manera de poner en evidencia los saltos lógicos de los argumentos que se están utilizando. En un aula donde este tipo de discusión entre docente y alumno sea omnipresente –a diferencia de los interrogatorios en los que el alumno intenta contestar al docente lo que éste quiere escuchar– paulatinamente los propios estudiantes participarán en discusiones fundamentadas y requerirán unos de otros la evidencia relevante. En este clima cuestionador y abierto en el que el disenso no significa "error" sino un motivo para emprender un refinamiento grupal de las ideas, las discusiones grupales son experiencias altamente enriquecedoras.[2]

Una estrategia para construir esta "cultura indagadora" en la clase es que en las actividades se generen productos concretos que se presten a la discusión grupal. Los informes de laboratorio, por ejemplo, se pueden usar como herramientas en el proceso de construcción social si se los organiza como si fueran trabajos de investigación originales y se pide a unos alumnos que evalúen los informes de los otros siguiendo las reglas de arbitraje de las revistas científicas.

Esto equivale a instaurar una especie de arbitraje similar al que opera para publicar artículos científicos en revistas profesionales. Este tipo de trabajo requiere de una guía clara por parte del docente, quien debe establecer

2. Debemos aclarar que el concepto clásico de "pregunta socrática" se refiere a la formulación de preguntas que fomentan respuestas lógicas e inductivas sin necesidad de realizar los experimentos cruciales para la comprensión de un fenómeno natural (de hecho, ni Sócrates ni la mayoría de sus contemporáneos eran muy afectos a las comprobaciones experimentales).

pautas para la crítica de un trabajo científico. Por ejemplo, se les puede pedir a los estudiantes que busquen, por un lado, qué conceptos no han sido explicados en el trabajo, qué afirmaciones no tienen evidencia explícita o qué fallas presenta el diseño experimental y, por otro, que encuentren ideas interesantes o novedosas en el trabajo y realicen propuestas para mejorarlo. Así, los alumnos estarán aprendiendo a ofrecer críticas constructivas.

LA SOCIOLOGÍA DE LA CIENCIA EN EL AULA

Además de adquirir herramientas de discusión y saber escuchar a los demás, y de aprender cómo se construye el conocimiento de manera social dentro del aula, los alumnos deben conocer la dinámica de trabajo de los científicos, dentro de la comunidad de investigadores en su totalidad. Para ello, podría ser una experiencia valiosa para los estudiantes invitar (si se cuenta con la posibilidad) a un científico para que cuente a los alumnos cómo es el "día a día" del trabajo científico y cómo se dan las discusiones en los grupos de investigación. Incluso podría explicar cómo funciona el sistema de arbitraje de las revistas y contar qué pasó con el último artículo que su grupo envió a publicación. ¿Fue aceptado? ¿Sugirieron cambios?

Otra estrategia que se puede utilizar con el mismo fin es que los alumnos lean y analicen alguno de los excelentes libros que describen cómo se hace ciencia en grupos de investigación profesionales. En los años setenta, por ejemplo, el sociólogo Bruno Latour trabajó un tiempo con los investigadores del Instituto Salk de investigaciones biológicas (La Jolla, Estados Unidos) y publicó un análisis sociológico de esa experiencia (Latour y Woolgar, 1995). El escritor Jonathan Weiner también pasó casi cinco años con el grupo de Seymour Benzer en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) compartiendo la actividad de los investigadores. En su libro *Time, love and memory* nos hace partícipes de su vivencia durante la búsqueda de los orígenes genéticos del comportamiento de *Drosophila melanogaster*, la mosca de la fruta (Weiner, 2000). La antropóloga Sharon Traweek (1988), por su parte, describió y analizó, usando un abordaje etnográfico, las tareas e interacciones sociales en tres laboratorios de física de altas energías en tres ciudades diferentes (dos en Estados Unidos y una en Japón). Asimismo, la dinámica social dentro de laboratorios en Francia y la Argentina ha sido objeto de diversas investigaciones realizadas por el sociólogo argentino Pablo Kreimer (1999).

El tema de la comunicación entre científicos y la forma en que la comunidad científica valida el conocimiento que ella misma genera pueden ser ilustrados en el aula de diferentes maneras. Una estrategia interesante es poner a los alumnos en contacto con revistas científicas reales (que pueden conseguirse gratuitamente en bibliotecas o en algunos casos a través de Internet) y mostrar cómo grupos de investigación de distintos países investigan un mismo tema y se citan los unos a los otros en sus trabajos. Otra forma de hacerlo es seleccionar artículos de diferentes épocas que investiguen un mismo tema y mostrar cómo el conocimiento se va construyendo sobre la base de las investigaciones de otros. Los artículos científicos son, la mayoría de las veces, demasiado específicos como para que los estudiantes los comprendan en profundidad, aunque es posible seleccionar artículos relativamente simples que pueden ser analizados en clase. La idea de poner a los alumnos en contacto con el material con el que se comunican los científicos "de verdad" tiene por objeto darles una idea más acabada del quehacer científico.

La relación entre ciencia y cultura, política, historia y fuerzas económicas es todo un capítulo en sí mismo. Un ejemplo paradigmático de esto es el efecto de la Segunda Guerra Mundial en el desarrollo de la bomba atómica y la física nuclear, y, más tarde, el efecto de esos descubrimientos en los sucesos históricos y en nuestra vida diaria. La biotecnología, la ingeniería genética, la revolución verde, el desarrollo de medicamentos, el efecto invernadero o incluso otros casos menos modernos, como la invención de la bombita eléctrica o el desarrollo mismo de la electricidad, son, entre muchísimos otros, ejemplos de enorme riqueza que se pueden usar en el aula para analizar las complejas relaciones entre ética, historia y ciencia. En un interesante trabajo práctico desarrollado en la Universidad de Harvard (http: //www.hnmun.org) se combinan naturalmente los aspectos geopolíticos y económicos con los de la ciencia del medioambiente. En esta actividad, los estudiantes se dividen en "delegaciones" por países y deben simular una reunión de las Naciones Unidas sobre calentamiento global y llegar a acuerdos políticos y económicos que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero.[3]

3. Esta actividad se ha realizado en la Argentina, así como en otros países, de acuerdo con el llamado "Modelo de Naciones Unidas", con el auspicio de UNESCO y de la organización cívica Conciencia <www.concienciadigital.com.ar>.

El docente puede sencillamente narrar los casos históricos. Para ello, existen numerosas fuentes detalladas de procesos históricos, inluyendo memorias y biografías de personajes importantes de la historia de la ciencia.[4] Otra buena estrategia para abordar este tema es crear en el aula "juicios" orales en los que las partes aporten evidencias y testimonios que defiendan o critiquen un desarrollo científico en relación con sus efectos sobre la sociedad. En el capítulo 11 damos un ejemplo sobre el tema de la experimentación con animales. Otros temas podrían ser el desarrollo de alimentos transgénicos o de centrales nucleares, o el uso de células embrionarias humanas en la investigación científica.

Por otra parte, pueden realizarse en clase lecturas críticas de artículos periodísticos formulando, por ejemplo, las siguientes preguntas: ¿qué evidencias científicas tiene el autor de lo que dice? ¿Cuáles de las cosas que dice son opiniones? ¿Qué intereses puede haber detrás de las palabras del autor? Este tipo de trabajo enseña a los estudiantes a cuestionar lo que leen sobre la base de su propio conocimiento, y a buscar información de confianza a partir de la cual tomar decisiones.

En cualquier caso, lo que buscamos en el aula es triple. Por un lado, queremos que los estudiantes, en su trabajo grupal, experimenten en carne propia cómo ponerse de acuerdo sobre lo que observan y sobre las inferencias e interpretaciones que hacen sobre esas observaciones. Por otro lado, deseamos que los estudiantes entiendan cómo la comunidad científica en su totalidad llega a estos acuerdos y qué tipo de herramientas usa para garantizar el libre intercambio de ideas y la crítica constructiva. Por último, queremos que aprecien cómo esta mecánica de trabajo hace que la ciencia sea vulnerable a los prejuicios y sesgos personales y culturales.

A continuación reunimos algunas de las prácticas pedagógicas que hemos sugerido en este capítulo para resaltar el aspecto social de la ciencia. En los dos capítulos que siguen ofreceremos ejemplos del uso de esas prácticas. El capítulo 11 presenta un debate sobre la experimentación con animales –un tema que involucra criterios científicos y éticos–. En el capítulo 12 se

4. Michael R. Matthews (1994) analiza en bastante detalle y con abundantes referencias el uso de la historia y la filosofía de las ciencias en la enseñanza de las ciencias. También puede verse el excelente libro de Conant (1957) con casos históricos. La editorial Nivola de España ha lanzado una colección de biografías de científicos (véase, por ejemplo, Díaz-Hellín, 2001) que incluyen a Faraday, Mendel, Lineo, Fleming y Copérnico. Los textos clásicos de Jacob Bronowski (1973) así como las historias de descubrimiento de Daniel Boorstin constituyen otro excelente punto de partida.

presentan diálogos socráticos para elaborar argumentos consistentes sobre lo que significa que algo "está vivo". Estos argumentos sirven, además, para mostrar por qué el significado de la idea "estar vivo" ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO SOCIAL DE LA CIENCIA

- Fomentar la discusión en pequeños grupos (análisis de experimentos, formulación de hipótesis, etc.).
- Promover las presentaciones orales y escritas de los alumnos a sus pares, con amplia discusión y crítica constructiva.
- Utilizar diálogos socráticos para detectar saltos lógicos en las argumentaciones y facilitar la construcción de argumentos consistentes.
- Buscar consensos en la clase sobre la base de la evidencia disponible.
- Considerar casos históricos en los que una idea científica fue modificada o descartada, haciendo hincapié en la naturaleza de la crítica (empírica, ideológica, filosófica u otra).
- Analizar con ejemplos concretos la relación entre ciencia y sociedad (en sus aspectos históricos, políticos, éticos y económicos).

11

EXPERIMENTACIÓN CON ANIMALES: SIMULACIÓN DE UN JUICIO

La ciencia es una empresa humana y, como tal, está sujeta a las influencias sociales, religiosas, políticas y económicas de cada momento histórico. Entender cómo se trabaja en ciencia, por lo tanto, implica también comprender este aspecto fundamental de la génesis del conocimiento.

Por otra parte, para formarse como sujetos críticos y con capacidad de tomar decisiones fundamentadas, es necesario que los estudiantes aprendan a discutir con bases sólidas las implicancias éticas y sociales de los avances de la ciencia, comprendiendo sus alcances y su impacto sobre diferentes aspectos de nuestra vida y de la del resto de los habitantes del planeta.

En este capítulo proponemos una actividad que tiene como objetivo abordar este aspecto social de la ciencia, fomentando el desarrollo de un espíritu crítico basado en argumentaciones constructivas. Es importante resaltar que no discutiremos aquí la veracidad o la falsedad de una teoría científica sino las consecuencias éticas de la aplicación de un descubrimiento o de una forma de trabajo dentro de la actividad científica. Hasta aquí hemos propuesto actividades en las que las diferentes posturas se dirimen sobre la base de experimentos que pueden cerrar la discusión en uno u otro sentido. En esta actividad, por el contrario, ejemplificaremos una situación que no se resuelve apelando a la realidad externa, como es el caso de una teoría que debe ajustarse a los aspectos empíricos del problema. Se trata de una situación, un problema, que tiene que ver con los valores vigentes en la

cultura donde la ciencia se desarrolla. Qué factores determinan los valores de una sociedad, cómo surgen y se construyen, e incluso si existen o no valores absolutos, es el foco de atención de disciplinas como la sociología, la antropología, la filosofía y la religión, y no nos ocuparemos aquí de ello.

El tipo de discusión que abordamos en este capítulo tiene profunda relevancia en la ciencia actual, ya que se debaten cuestiones controversiales como la experimentación con células embrionarias humanas, el desarrollo de alimentos transgénicos o la utilización de la energía nuclear. La estrategia didáctica que proponemos aquí –la simulación de un juicio a un científico– permite generar de manera lúdica un espacio en la escuela para la discusión de problemas científicos con un profundo contenido ético.

La estrategia del juicio promueve que los estudiantes se pongan “en la mente del otro” a la hora de argumentar y contraargumentar, desarrollando su capacidad de detectar huecos lógicos en argumentos propios y ajenos. En este sentido, la simulación de un juicio en la clase ayuda a generar herramientas que también son útiles para los debates y la construcción conjunta, por parte de los alumnos, de ideas científicas o, más en general, de una capacidad crítica racional que les permita enfrentar las más diversas situaciones.

La elección del tema para la simulación de un juicio se puede hacer a partir de una noticia periodística, de un caso tomado de la realidad y modificado para el trabajo en el aula o incluso puede ser una historia inventada. En cualquier caso, la “historia” abordará un tema que, según la estimación del docente, pueda resultar provocativo para los alumnos. En este capítulo utilizaremos como ejemplo un caso ficticio que trata el tema de la experimentación con animales.

ACTIVIDAD: JUICIO A LA EXPERIMENTACIÓN CON ANIMALES

Antes de comenzar, se dividirá a los estudiantes en dos grupos y se les asignará arbitrariamente el papel de la defensa y la fiscalía. Es conveniente asignar estos roles de antemano, de manera que los alumnos tengan suficiente tiempo para ir pensando en los argumentos que utilizarán. El trabajo suele ser incluso más enriquecedor para los alumnos si les toca representar una postura contraria a la suya personal, porque los desafía a encontrar argumentos convincentes desde una perspectiva opuesta a sus creencias.

Luego, el docente leerá a la clase un caso supuestamente real como el que presentamos a continuación:[1]

1. Conviene plantear la historia como un caso real, aunque al final de la actividad se les explique a los alumnos que es inventado, ya que esto suele generar una mayor motivación en ellos.

El caso del doctor Andrada

Marcos Andrada es el director de un grupo de investigación que lleva 15 años trabajando sobre un tema apasionante: comprender mejor el cáncer, a fin de intentar encontrar una cura para esa enfermedad. En el transcurso de estos últimos años, el grupo del doctor Andrada ha hecho estudios con células en cultivo y con ratones, que lo han llevado a descubrir algunos factores relacionados con la multiplicación descontrolada de las células que forman los tumores. Por ello, además, el doctor Andrada recibió diferentes premios en mérito a sus investigaciones y es un miembro reconocido de la comunidad científica y respetado por su grupo.

En los últimos meses, sus investigaciones han avanzado hasta llegar a un punto culminante: el doctor Andrada piensa que puede estar en las puertas de un descubrimiento que podría revolucionar los tratamientos conocidos para el cáncer, y que incluso podría ser la cura tanto tiempo buscada. Claro que uno nunca está seguro de cuáles pueden ser los resultados de una investigación, aunque Andrada rara vez se equivoca en sus pálpitos.

El equipo de investigadores confía plenamente en las ideas de Andrada, que hasta ahora han demostrado ser bastante acertadas. Siempre han respetado a su director por "ir para adelante", y están muy entusiasmados en dar el salto que podría llevarlos a descubrir la cura de la enfermedad tan temida. Por otro lado, los diversos integrantes del grupo han aportado evidencias, hipótesis e intepretaciones a lo largo de las investigaciones que han llevado hasta este punto.

Pero lo que sucede en un grupo de células en cultivo, y en animales pequeños, suele ser bastante diferente de la respuesta que un tratamiento puede tener en los seres humanos, y eso Andrada lo sabe mejor que nadie. Por eso, el paso que sigue es probar sus ideas en monos. Los experimentos consistirán en inyectar tumores a los monos, inyectarles luego diferentes compuestos que podrían detener el tumor, y por último matar a los monos para comprobar si el tumor se detuvo y si hubo metástasis en otras partes del cuerpo, a través de biopsias de los tejidos. Para que los resultados sean confiables, será necesario experimentar durante largos meses con muchos monos, tal vez varias decenas.

A continuación se les contará a los alumnos cómo siguió el caso: el doctor Andrada persistió con sus experimentos y un grupo de defensores de los derechos de los animales decidieron entablarle un juicio ético por realizar experimentos con monos.

Preparaciones para el juicio

Para preparar la defensa o la acusación se les asignará a los estudiantes un tiempo determinado (habitualmente es suficiente con 20-30 minutos, aunque, si la actividad resulta exitosa, podrá continuarse en otras jornadas, en las que la fiscalía y la defensa aportarán nuevas pruebas que hayan conseguido de diversas fuentes).

Cada grupo deberá elegir un abogado que presente un alegato a la corte. Cada grupo también deberá elegir tres testigos y preparar preguntas para que su abogado los interrogue. Es conveniente que cada grupo interrogue a sus propios testigos (es decir, que no haya interrogaciones cruzadas) para que los testigos puedan elaborar sus respuestas de antemano, pero el docente puede utilizar la estrategia de juicio que crea adecuada. El rol de abogado puede rotar durante el juicio, si el equipo lo prefiere, de manera que más alumnos puedan tener un papel protagónico.

Durante este tiempo de discusión grupal es fundamental que el docente siga de cerca a los grupos y los oriente en sus discusiones. Por ejemplo, es importante aclararles a los alumnos que el doctor Andrada se desempeñó de acuerdo con las normas internacionales de trabajo con animales de experimentación (es decir, que no los maltrató especialmente más allá de la inyección de tumores), ya que, en muchos casos, los alumnos aducen justamente eso como argumento principal (por ejemplo, centran su alegato en que Andrada maltrataba a los monos, o cazaba ejemplares de especies en extinción). Esta labor del docente es importante para que los alumnos no se detengan en argumentos técnicos que se pueden rebatir fácilmente conociendo las normas básicas de trabajo con animales de laboratorio, sino que vayan más allá y logren encontrar razones más profundas por las que enjuiciar la ética del trabajo con animales.

El docente deberá guiar a los grupos de estudiantes para que piensen de antemano qué argumentos podrán utilizar sus rivales, de manera de hacer más eficaz su propia postura ante la corte. Esta estrategia didáctica fomenta la

capacidad de ponerse en el lugar del otro y ver el mundo desde su perspectiva, capacidad muy importante a la hora de discutir fundamentadamente (o simplemente de convivir en una comunidad).

El juicio comienza

Pasado este tiempo de preparación, comenzará el juicio. El docente será el juez.[2] Cada parte presentará su alegato inicial y llamará a sus testigos para interrogarlos. El equipo contrario podrá objetar si lo cree necesario; conceder o denegar las objeciones quedará a cargo del juez. Cuando se inicien los alegatos, el juez indicará a cada equipo que deberá tomar cuidadosas notas de los argumentos presentados por el equipo rival. La necesidad de tomar notas surge del hecho de que existirá un alegato final en el que cada parte deberá responder a las evidencias y los argumentos presentados por el otro equipo. Esto contribuye a que los alumnos escuchen los argumentos del equipo contrario (suele pasar que están tan entusiasmados con su propia presentación que no prestan atención a los argumentos rivales). Además, ayuda a que comiencen a ver el tema desde un punto de vista opuesto al que vienen pensando.

Según nuestra experiencia, a los alumnos les cuesta más encontrar argumentos en contra del doctor Andrada que en su favor. Suelen, como decíamos, basar su acusación en argumentos técnicos como el maltrato a los animales, la suciedad del laboratorio o el tráfico ilegal de seres vivos. Estas acusaciones pueden ser rebatidas argumentando que los laboratorios deben cumplir con normas internacionales de tratamiento de los animales y de higiene. Ello obliga a los alumnos a centrar sus argumentos en cuestiones más de fondo, que plantean interrogantes morales. Por ejemplo, ¿es ético utilizar otras especies para beneficiar a la nuestra? ¿No es cierto que otros animales también usan otras especies en su beneficio? ¿Las especies tienen derechos? ¿Estamos hablando de la protección y derechos de una especie en su conjunto o de los individuos que la componen? Para el caso, ¿tienen derechos los ecosistemas? ¿Es necesario protegerlos?

2. Una forma (que hemos utilizado frecuentemente) de hacer esto más divertido para los alumnos es que el docente se disfrace de juez con una peluca de algodón, que consiga un muñeco para hacer de doctor Andrada y lo siente en el banquillo de los acusados.

Uno de los argumentos más profundos que han presentado nuestros estudiantes es el cuestionamiento ético de infligir dolor a un ser vivo o terminar con su vida. ¿Es correcto causar dolor a otro ser vivo en beneficio de la propia especie? Y, como argumento contrario, ¿no es esto lo que hacemos cuando matamos animales para comer, por ejemplo? La fiscalía también suele argumentar en contra de la experimentación con seres inteligentes como los monos, y menciona el hecho de que los monos tienen rasgos de inteligencia comparables a los de los humanos, como la capacidad de resolver problemas y de construir herramientas. Uno de los contraargumentos que se han presentado en este caso plantea que los monos no entrarían en la categoría de seres inteligentes porque, por ejemplo, no pueden hablar como los seres humanos. Y que por lo tanto no sería inmoral experimentar con ellos.

Del lado de la defensa, algunos argumentos interesantes tienen que ver con la posibilidad de curar a seres humanos de una enfermedad por ahora incurable y así evitar el dolor de perder a seres queridos: ¿cuántas vidas se salvarían gracias a las vidas de algunas decenas de monos? Los alumnos suelen traer "testigos" que han perdido a un ser querido a causa del cáncer o a pacientes con la enfermedad para forzar la elección entre el sufrimiento de los monos y el del humano, y lograr conmover a la corte haciendo que se ponga en el lugar de los testigos que sufren. También la defensa suele invocar la legitimidad de usar a otros organismos para bien de nuestra especie (invocando la legitimidad de alimentarnos de otros animales).

Esta estrategia de trabajo permite, además, que ciertos estudiantes que muchas veces no participan activamente de la clase de ciencias puedan tener un papel protagónico. En este sentido resulta un tipo de actividad muy interesante, ya que integra a alumnos que no se consideraban a sí mismos con capacidades para las ciencias, y a menudo también se "destapan" alumnos con capacidades actorales que ganan un nuevo respeto de sus pares. En el capítulo 8 se presentan consideraciones positivas de este mismo tipo.

Tras ambas presentaciones, el juez llamará a un cuarto intermedio en el que cada grupo tendrá un tiempo (alrededor de 10 minutos) para preparar su alegato final sobre la base de lo presentado por la defensa y la fiscalía en la primera etapa. Más tarde, cada equipo presenta su alegato final.

El jurado decide

Existen diversas maneras de dar cierre a esta actividad, dependiendo de las características del grupo. Una estrategia que nos ha dado buenos resultados es reunir nuevamente a todos los participantes ofreciéndoles actuar de jurado, no sólo a partir de los datos presentados o dentro de los roles adoptados durante la representación, sino mediante sus propias opiniones y reglas.

Esto suele generar un intenso debate, moderado por el docente, quien propondrá al grupo llegar a una opinión consensuada para este juicio y la experimentación con animales en general basada en los argumentos presentados y las perspectivas personales de los alumnos. La idea de este cierre no es llegar a una sentencia del tipo "inocente o culpable" sino poner en evidencia los diferentes puntos de vista que se manifiestan cuando la ciencia se enfrenta con los valores de una determinada sociedad. Algunas preguntas para discutir con los alumnos en el cierre de este debate pueden ser las siguientes: ¿con cuáles animales es permisible experimentar y con cuáles no? (¿Una cucaracha? ¿Un ratón? ¿Un mono?) ¿Quién establece ese límite y cómo? (¿El Congreso Nacional? ¿La comunidad científica? ¿El presidente? ¿El Papa?) ¿Por qué sentimos más pena por algunos animales que por otros? ¿Qué entendemos por inteligencia? ¿Qué entendemos por dolor? (¿Un insecto puede sentir dolor? ¿Es igual a o diferente del dolor de un ser humano?) Todas estas preguntas son útiles para abrir el debate acerca de cuestiones sumamente profundas relacionadas con qué es lo que nos define como humanos.

Otra forma de culminar la actividad es que los alumnos realicen una votación acerca de la sentencia que merece el doctor Andrada. Esta estrategia funciona mejor con alumnos más chicos, que suelen demandar ver "resuelto" el juicio. Sin embargo, generalmente es complicado que los estudiantes abandonen la postura de la defensa o la fiscalía que tuvieron dentro del juicio en la votación ya que cada uno de los equipos desea "ganarle" al rival. En este caso, dependerá del docente que los participantes del juicio realicen una evaluación objetiva de los argumentos de una u otra parte antes de la votación para que no se convierta en una competencia sin reflexión real.

Cierre: la ética y las leyes

En este juicio se discute el contenido ético de la experimentación con monos y con animales en general, pero no su legalidad o ilegalidad. Aun-

que cabe preguntarse: ¿cuál es la diferencia entre ética y legalidad? La actividad del juicio puede ser el puntapié inicial para comenzar un trabajo conjunto con la clase de filosofía.[3] ¿Existen valores éticos absolutos o varían de tiempo en tiempo y de sociedad en sociedad? ¿Qué mecanismos hay en una sociedad para decidir qué cuestiones son éticas, y cómo se relaciona eso con las normas que regulan el funcionamiento de la sociedad?

Como continuación de este juicio se puede desarrollar una nueva actividad en la que los alumnos, en lugar de discutir el tema como una corte, lo hagan como cámara legislativa. ¿Qué tipo de ley podrían promulgar para regular la experimentación con animales? ¿Cuáles son los valores e intereses a tener en cuenta? ¿Cómo representar distintos sectores de la sociedad que pueden tener intereses o valores encontrados? Para esta segunda actividad los alumnos deberán investigar acerca de cómo se establecen los límites legales de la investigación científica en el nivel internacional y en nuestro país, consultando con científicos y abogados o buscando información en Internet.[4] Este formato varía del propuesto, en que los estudiantes deben trabajar más para establecer un consenso creativo, es decir, para arribar a una propuesta que satisfaga a todas las partes. Esta actividad se adapta muy bien a temas de medioambiente o a proyectos que impactan sobre diversos sectores de la sociedad. En estos casos, se puede dividir a los estudiantes en grupos que representen a cada uno de los sectores (por ejemplo, granjeros, leñadores e indígenas en la selva amazónica) y proveerlos de material sólo con información acerca de su sector, de modo de forzarlos a escuchar argumentos novedosos por parte de los otros sectores. Las discusiones pueden incluso terminar abiertas, reflejando cómo en la realidad los consensos son difíciles de alcanzar y cómo la ciencia implica problemas en el nivel social que son de profunda complejidad.

3. Varios artículos interesantes sobre los derechos de los animales se pueden encontrar en el libro *Enviromental Ethics* de Pojman (2001), en el cual se presentan argumentos que incluyen consideraciones morales de Kant sobre nuestras obligaciones para con los animales.

4. Por ejemplo, véase <www.ethicsweb.ca/resources/animal-welfare/index.html>, donde pueden hallarse numerosos *links* a sitios de derechos de animales y temas relacionados. O también <www.faseb.org/opa/animal/default.html> y <www.ethics.ubc.ca/start/animal.html>.

12

¿VIVO O NO VIVO?: DIALOGANDO SE APRENDE

En el capítulo anterior vimos cómo el debate sobre cuestiones éticas permite promover en el aula una visión de la ciencia como asunto social. En este capítulo veremos cómo llevar al aula otro elemento esencial del aspecto social de la ciencia: la construcción consensuada del conocimiento. La técnica de enseñanza que ejemplificaremos para construir consenso sobre un concepto científico se basa en una tarea grupal de cuestionamiento, constituida por preguntas y respuestas en forma de diálogo guiado por el docente.

La construcción del conocimiento científico de manera consensuada en el aula permite presentar a la ciencia como un tipo muy especial de debate, en el cual los observadores de fenómenos deben ponerse de acuerdo sobre lo que sucede y por qué sucede. Al adquirir un rol activo en la tarea, los alumnos van realizando una serie de operaciones mentales lógicas que mejoran la coherencia interna del discurso a medida que se cuestionan los razonamientos.

En el ejemplo que ofreceremos a continuación, el docente diseña para los alumnos un diálogo socrático, buscando extraer del interlocutor, a través de preguntas y repreguntas, las premisas que le permitan construir un discurso lógico y coherente acerca de un tema en particular. El diálogo puede ser complementado por experimentos, aunque esto no es estrictamente necesario. De cualquier manera, la discusión se complementa en forma permanente con "experimentos mentales" (*thought experiments*), del tipo: "si

realizara tal experimento o análisis y hallara tal resultado, entonces llegaría a esta conclusión".

El ejemplo que brindaremos en este capítulo está relacionado con la definición de la materia viviente y los diferentes abordajes que, históricamente, se han propuesto para contestar esta pregunta. No siempre es posible determinar a ciencia cierta si un organismo está vivo.[1] Justamente, la experiencia que proponemos en este capítulo consiste en describir un objeto y determinar la serie de reglas que se pueden aplicar para determinar si proviene de un organismo viviente.

DIÁLOGOS EXTRATERRESTRES

Un ejemplo similar al nuestro fue propuesto por Gregory Bateson en su libro *Espíritu y naturaleza* (1990, retomado en Bonaparte, 2001), cuando narra su particular enfoque para encontrar reglas en la naturaleza. Bateson cuenta de esta manera su acercamiento a los estudiantes de entonces:

> En la década de 1950 era instructor de jóvenes de San Francisco, California.
> Era una pequeña clase de 10 a 15 estudiantes, y yo sabía que iba a ingresar a una atmósfera de escepticismo rayano en la hostilidad. Cuando entré, percibí claramente que suponían que yo era una encarnación del demonio, que venía a increparles dónde estaba el sentido común que producía guerras atómicas y pesticidas. En esos tiempos (¿y todavía hoy?) se creía que la ciencia era "ajena a los valores" y que no estaba guiada por "emociones".

Por supuesto, ésta es la misma experiencia que suelen vivir los profesores cuando entran en su clase de ciencias. Bateson prepara el escenario cuidadosamente, y guía a sus alumnos a través de un problema sencillo:

1. Existen diversos intentos de una definición de la materia viviente –al fin y al cabo, esto constituye el objeto central de la biología–. Entre los muchos aportes sobre el tema se pueden destacar el enfoque termodinámico de Erwin Schrödinger (1999), los principios unificadores propuestos por Daniel E. Koshland (programa, improvisación, compartimentos, energía, regeneración, adaptabilidad y exclusión) y la hipótesis de la autopoiesis de Humberto Maturana y Francisco Varela (citada en Maturana y Varela,1984), basada en la idea de que los organismos vivos generan su propia estructura.

> Llevé conmigo dos bolsas de papel; de una de ellas saqué un cangrejo recién cocinado y lo puse sobre el escritorio, diciéndoles más o menos esto: "quiero que me den argumentos que me convenzan de que este objeto es el resto de una cosa viviente. Si quieren pueden imaginar que son marcianos y que en Marte están habituados a ver cosas vivientes, siendo ustedes mismos seres vivos; pero, desde luego, nunca han visto cangrejos o langostas. Hasta allí llegaron, tal vez llevados por un meteorito, un cierto número de objetos como éste. Deben examinarlos y llegar a la conclusión de que son restos de cosas vivas. ¿Cómo llegarían a esa conclusión?".

Al poner reglas en el relato, Bateson está guiando a los estudiantes al tipo de razonamiento socrático que desea realizar. Efectivamente, con la consigna de que "son marcianos", los obliga a evitar toda explicación conocida que se base en la comparación, del tipo "eso está vivo porque es un cangrejo, y yo sé que están vivos". Los resultados observados son muy interesantes:

> Lo primero que observaron fue que es simétrico, o sea, que su lado derecho se parece al izquierdo... Luego observaron que una de sus tenazas era más grande que la otra. Así que no era simétrico. Alguien dijo "sí, una tenaza es más grande que la otra, pero ambas están formadas por las mismas partes". ¡Ah, qué noble y hermoso pensamiento! ¡Cómo arrojó ese estudiante al tacho de la basura, con toda cortesía, la idea de que el tamaño podría tener una importancia primordial o profunda, y fue en cambio tras la pauta que conecta! Descartó una simetría a favor del tamaño a favor de una simetría más honda en las relaciones formales!

El rol de Bateson, o del docente, es el de facilitador: no provee datos sino que guía la discusión en el sentido deseado, sin invalidar ninguna de las opiniones que se vayan dando, sino brindando el marco para su discusión y, en todo caso, exponiendo las falencias lógicas de los argumentos (o, mejor aún, logrando que entre los mismos estudiantes se consideren dichas falencias) a través de la pregunta o el comentario mínimo que encauce el diálogo. En este ejemplo en particular, la descripción del "objeto cangrejo" lleva naturalmente a hablar de conceptos no sólo de simetría sino también de homología/analogía.

ACTIVIDAD: ¿VIVO O NO VIVO?

Proponemos a continuación una actividad fácil de realizar en el aula, en el laboratorio o incluso en una salida al campo. Hace uso de la modalidad de diálogo socrático, aunque debe quedar claro que la pregunta planteada no exige una respuesta única o necesariamente aceptada; lo interesante es el proceso que se atraviesa para llegar a las posibles explicaciones. El rol del docente es, una vez planteadas claramente las consignas del caso, estimular la discusión en y entre los grupos de trabajo y ofrecer algunas pautas adicionales mientras el ejercicio se va desarrollando.

Esta actividad tiene varios objetivos puntuales. Por una parte, promueve que los estudiantes discutan para intentar determinar una definición de la materia viviente y se familiaricen con la historia de las ideas científicas acerca de la materia viva. Por otra, introduce conceptos de sistemas de clasificación y fomenta el ejercicio de la descripción rigurosa y sistematizada. Finalmente, como ya mencionamos, apunta a estimular la construcción de discursos lógicos con una fuerte coherencia interna, la discusión grupal y el trabajo en equipo.

La actividad se realiza con grupos de 5-7 participantes, aunque se puede adaptar fácilmente a otros números. Incluso se puede realizar en forma individual, de modo tal que cada participante tenga a su cargo la descripción y "defensa" de un objeto frente al resto del grupo. La actividad, cuya duración aproximada es de una hora, consta de tres partes:

a) Exposición de la consigna y análisis grupal del objeto o los objetos a describir.
b) Presentación del caso por parte de un representante del grupo (y comentarios de los otros grupos).
c) Discusión general de los hallazgos y razonamientos expuestos.

La actividad se puede realizar de dos maneras diferentes. Por un lado, se puede partir de objetos presentados por el docente. En tal caso, es más sencillo guiar la discusión y el diálogo, ya que la elección de los objetos no será azarosa y se puede contar de antemano con elementos para enriquecer el diálogo que se vaya desarrollando. La alternativa es realizar la actividad en forma consecuente con una salida de campo en la que se recojan diversos elementos (definiendo "salida de campo" en sentido muy amplio, ya que puede consistir en la recolección de objetos en la calle o en el patio del colegio).

Los objetos se distribuyen entre los grupos de trabajo. Nuestra experiencia nos indica que lo más provechoso es que cada grupo tenga a su cargo un objeto en particular, y a partir de allí pueda diseñar sus argumentaciones. Una vez distribuidos los objetos, el docente explica la actividad y las consignas. Les propone a los participantes que para esta actividad ellos se deben "convertir" en extraterrestres y su tarea es, luego de haber explorado la Tierra, llevar de vuelta a su planeta una serie de objetos (incluidos los que recolectaron) y determinar si provienen de organismos vivos o inertes. Para el caso, definimos que un objeto u organismo "proviene de algo vivo" si estuvo vivo alguna vez, *no* si fue fabricado por un organismo viviente o pensante. Dentro de las reglas del juego, resulta muy importante que se atengan al concepto de "extraterrestre" en el sentido de que no conocen los objetos terrestres (es decir, no pueden decir "eso es un caparazón de caracol, y yo sé que viene de algo vivo", porque no conocen los caparazones o caracoles). A continuación, los grupos, trabajando por separado, comienzan a describir los objetos e hipotetizar sobre su posible origen. Dentro de las consignas se aclara que se pueden proponer pruebas específicas para determinar el origen viviente o no de los objetos en estudio (por ejemplo, análisis químicos o físicos determinados). La discusión interna suele durar unos 15-20 minutos.

Luego, los "extraterrestres" presentan sus conclusiones al Gran Jurado, integrado por el docente y por todos los participantes de los otros grupos. Un representante del grupo (ayudado por sus compañeros) comienza por describir exhaustivamente el objeto (en términos no terrestres, claro) y da su veredicto en cuanto a su origen. El Gran Jurado intentará refutar estas conclusiones con contraejemplos o razonamientos llevados al absurdo (por ejemplo, si están describiendo al caracol como un objeto que "viene de algo vivo porque tiene forma de haber contenido algo", se refuta muy fácilmente presentándole un zapato al grupo y diciéndole que también tiene forma de haber contenido algo, pero podemos asegurar que no "viene" de un organismo vivo).

Entre los objetos elegidos, se debe considerar que haya elementos que claramente provengan o no de organismos vivos; si bien a primera vista esto parece facilitar el diálogo, ciertamente requiere de un razonamiento abstracto adicional, ya que exige hacer un esfuerzo por alejarse del conocimiento cotidiano (estamos en Marte, y allí una bolita o una piedra pueden provenir de un organismo vivo). En términos cognitivos, se está requiriendo que los alumnos formulen lo que se denomina una "teoría de la mente" de segundo orden, ya que se les exige recrear un mundo distinto, pero coherente, aun asumiendo principios universales para la materia viviente.

EJEMPLOS DE DIÁLOGO

Los objetos a distribuir entre los grupos de alumnos pueden ser de lo más variados; en realidad, no hay ninguna limitación al respecto. Daremos a continuación tres ejemplos de diálogos basados en experiencias reales con grupos de estudiantes.

a) El caso del cangrejo

Una vez que el grupo recibió un caparazón de cangrejo y discutió su procedencia en términos "extraterrestres", debió defender su postura. He aquí el diálogo.

Estudiante 1: Señores del jurado, lo que tengo aquí es una prueba irrefutable de que en el planeta que acabamos de explorar hay vida. Hemos analizado en detalle la composición de este objeto y concluimos que está formado por material orgánico, que...

Docente: ¿Perdón? ¿Qué quiere decir orgánico?

Estudiante 1: Como todo extraterrestre sabe, los compuestos orgánicos son los que contienen carbono, y están presentes en los organismos vivos.

Docente: ¿Sólo en los organismos vivos? Si quisiéramos fabricar un compuesto orgánico en el laboratorio, ¿no podríamos?

Estudiante 2 (de otro grupo): Sí, claro que podríamos. En el libro dice que se puede sintetizar urea en el laboratorio...

Estudiante 1: Señores del jurado, que conste que ellos no pueden hablar ahora...

Docente: Pero tienen razón. Si nos salimos un poco del juego, puedo recordarles que efectivamente durante mucho tiempo se consideró que los compuestos del carbono correspondían inequívocamente a material vivo (o que había estado vivo), hasta que un químico llamado Friedrich Wöhler logró sintetizar urea.

Estudiante 1: Pero seguro que hay algunos materiales que sólo están presentes en los organismos vivos. Por ejemplo, el ADN.

Docente: De nuevo: con paciencia y buena técnica ustedes pueden fabricar ADN en un tubo de ensayo. Lo mismo vale para las proteínas, que eran otro baluarte de los que defendían que los organismos vivos tenían materiales diferentes de los no vivos.

Estudiante 1: Bueno, entonces cambiamos de estrategia...

Docente: Antes de que cambien, aclaremos que la postura que están tomando es la que se conoce como vitalismo: las cosas vivas son intrínsecamente diferentes de las inertes porque su composición química y física es distinta.

Estudiante 2: ¡Vitalistas! ¡Vitalistas!

Docente: ¡Orden en la sala!

Estudiante 1: Si me permiten continuar con mi exposición les puedo contar que este objeto fue hallado en una playa, cerca del mar, y podemos notar inmediatamente que, si trazamos una línea por la mitad, es perfectamente simétrico.

Docente: ¿Perfectamente?

Estudiante 1: Bueno, casi... No lo medimos, pero es casi igual.

Docente: ¿Y por qué no lo miden?

(Intervalo para medición.)

Estudiante 1: Como decíamos, es casi igual: mide 2,3 cm hacia la derecha y 2,5 cm hacia la izquierda.

Estudiante 2: Y, además, tiene manchas diferentes en ambos lados.

Estudiante 1: Pero tiene dos ojos perfectamente simétricos...

Docente: ¿Dos qué? En este planeta no conocemos esa palabra...
Estudiante 1: Bueno, estos “cosos” de acá adelante que seguramente le sirven para ver, porque se parecen a los nuestros.

Docente: ¿A nuestras antenas…? Cuidado, ahora están usando dos criterios diferentes. Por un lado el criterio de simetría, en este caso bilateral, y por otro, un criterio morfológico: “esto tiene esta forma y por lo tanto sirve para tal cosa”. Vamos por partes...

Estudiante 1: Veamos lo de la simetría. No es perfecta, pero se parece bastante. Es cierto que nosotros podemos dibujar algo perfectamente simétrico, pero lo estamos copiando de la naturaleza viva.

Docente: Algo de eso hay. Lo simétrico nos parece más bello, y más perfecto. Sin saberlo, consideramos a una persona más simétrica como más bonita. Aunque no nos demos cuenta de que no es perfectamente simétrica.[2]

Estudiante 2: ¿Y eso qué tiene que ver con la vida?

Docente: No lo sé. Pero puede decirnos algo sobre cómo se fue desarrollando este organismo. Si yo les dibujara cómo es este organismo completo (porque otras expediciones han traído más material), se vería con estos apéndices largos a ambos lados del cuerpo, que no son muy simétricos, ya que hay algunos más largos que otros.

Estudiante 1: Pero parecen tener las mismas relaciones.

Estudiante 2: O la misma estructura.

Docente: Exactamente. Aunque no podamos decir mucho acerca de su función ni de esto que ustedes llamaron “ojos”: no podemos definir algo por la forma, o porque se parezca a otra estructura con una función conocida.[3]

Estudiante 1: Bueno, pero esto es un cangrejo, ¡y estaba vivo!

2. Este comentario puede acompañarse con un ejercicio que resulta muy ilustrativo. Pueden sacarse fotografías de alguien sonriendo, y luego digitalizarlas (por medio de un escáner, por ejemplo). Con un programa de ilustración es sencillo partir la foto al medio, y generar una foto completa a partir de cada mitad. De esta manera se logra una cara formada por dos “hemicaras” izquierdas y otra compuesta por dos “hemicaras” derechas. Es sorprendente comprobar que la expresión de ambas “caras” es completamente diferente; una estará mucho más feliz que la otra.

3. Excelente oportunidad para introducir los conceptos de homología y analogía.

b) El caso del caracol

Para este ejemplo resulta ideal conseguir un caparazón de caracol marino, aunque cualquier otro podrá resultar útil.

Estudiante 1 (miembro del grupo que recibió el objeto): Gran jurado, claramente este objeto proviene de algo vivo, porque le hicimos un análisis con la “recontrasupermaquinola” de análisis de materia viviente y el resultado fue “sí”.

Docente: ¿Y qué mide esta máquina?

Estudiante 1: Esteeee... compara el objeto con todos los objetos vivos conocidos y determina si pertenece a alguno de esos grupos.

Docente: Bueno, pero supongo que la máquina tendrá una base de datos correspondiente a los objetos de nuestro planeta solamente; recuerden que esto proviene de un planeta muy lejano.

Estudiante 2: Pero, si no podemos comparar, ¿cómo hacemos?

Docente: Justamente, ése es el problema. Estamos tratando de ver si hay alguna forma de caracterizar a los objetos vivos o que provienen de algo vivo.

Estudiante 2: Si está vivo es muy fácil: se mueve, se reproduce, respira o fotosintetiza.

Estudiante 1: Las plantas no se mueven.

Docente: Y que yo sepa, ninguno de ustedes se ha reproducido hasta el momento, y están bastante vivos. Por otro lado, la respiración es un proceso bastante complejo, que puede utilizar diferentes sustratos, y hay algunas formas que se mantienen quiescentes durante bastante tiempo.

Estudiante 2: Si es tan difícil establecer que un objeto está vivo, es casi imposible determinarlo cuando ya no lo está...

Docente: Veamos el objeto que les tocó.

Estudiante 1: Vimos además que tiene un hueco acá, que seguramente servía para contener algo. Además, como el caparaz..., digo, el objeto, es muy duro, seguramente servía como protección de partes más blandas.

Docente (se saca un zapato y lo arroja hacia el grupo): Este objeto también es bastante duro y tiene un hueco que seguramente contuvo algo... pero no viene de algo vivo.[4]

Estudiante 1: Por cómo huele... ¡viene de algo en descomposición!

Docente: No es para tanto... Nuevamente la forma, el criterio morfológico, no nos dice demasiado.

Estudiante 1: También tiene una espiral.

Docente: Ajá. ¿Y dónde más hay espirales en la naturaleza?

Estudiante 1: En las galaxias, en los tornados...

Estudiante 2: ¡En el inodoro!

Docente: ¿Por qué tendrá una espiral este objeto?

Estudiante 1: Mmmmmhhhh, por ahí es para atraer a otros objetos similares; tal vez lo consideren más lindo.

Docente: Puede ser, pero yo no diría que lo tiene “para” eso; en todo caso le viene bien. ¿Qué más puede ser?

Estudiante 1: Tal vez tuvo que crecer y fue haciéndolo así, en forma de espiral.

Docente: No está nada mal. Parece ser una buena estrategia para ganar terreno. Cuando hay que ganar espacio en una estructura dura, en general hay que usar este tipo de estrategias. Algo similar

4. Lo que sí es cierto es que el zapato fue construido por seres vivos y en este sentido guarda cierta similitud con el caparazón de caracol. El biólogo Jacques Monod (1993) argumenta en su libro *El azar y la necesidad* que una estructura altamente compleja que sugiere una función sí es evidencia de procedencia viva.

puede ocurrir con lo que haya dentro de una estructura dura: si está limitado y tiene que crecer, ¿cómo se las arregla?

Estudiante 2: Y… me parece que no forma espirales.

Docente: No necesariamente. Volvamos a la Tierra por un momento: piensen que van de compras al supermercado y compran un seso de vaca.

Estudiantes: ¡Puajjjjj!

Docente: Bueno, bueno, aguanten el asco un momento y piensen en la estructura...

Estudiante 1: Tiene como arrugas, ¿no?

Estudiante 2: Se llaman circunvoluciones.

Docente: No todos los bichos las tienen. Los cerebros de bichos más simples son muy lisitos.

Estudiante 1: Debe ser porque éste tuvo que crecer...

Estudiante 2: Y tenía un cráneo duro alrededor, así que tuvo que producir arrugas para ganar espacio.

Estudiante 1: Pero ese solo dato no me dice que está vivo.

Docente: Efectivamente, ningún dato por sí solo nos dirá si el objeto proviene o no de algo vivo. Sin embargo, la estructura nos puede dar indicios de cómo fue su historia.

Estudiante 2: Es como hacer su biografía a partir de la foto. Aunque no sepamos de qué estaba hecho.

Docente: Nuevamente, estamos viendo que la composición, o incluso la forma general, no tienen mucho que ver con que un objeto provenga necesariamente de algo vivo. El problema es muy difícil, y todavía los científicos no se han puesto muy de acuerdo.

c) El caso de la botella de plástico

Este grupo recibe una botella de plástico vacía, y debe determinar si es un objeto que estuvo vivo o proviene de un organismo vivo.

Estudiante 1: Nosotros encontramos un montón de estos objetos apilados, y trajimos uno. Es indudable que proviene de un organismo vivo, aunque ahora está muerto.

Docente: ¿Por qué dicen eso?

Estudiante 1: Estaban todos los objetos juntos, y dedujimos que se trataba de un cementerio de este tipo de objetos, que se juntan para morir en algún lado.

Docente: Buen punto, pero eso no les indica demasiado. En muchos lados está lleno de piedras, y ni en este planeta ni, suponemos, en otros, las piedras provienen de algo vivo ni se juntan para morir.

Estudiante 1: Pero esto no se parece en nada a una piedra. Es muy... regular.

Estudiante 2: Y simétrico. De simetría radial, para ser exactos.

Docente: ¿Qué quieren decir con "regular"?

Estudiante 1: Que si medimos los ángulos son perfectamente rectos, y el diámetro del cilindro es también exactamente igual en cualquier lado que lo midamos.

Docente: Suena sospechoso, ¿no?

Estudiante 2: Sí, las cosas vivas que conocemos no son tan perfectas. Además, no necesitan serlo.

Docente: De nuevo, el criterio comparativo no es el mejor, pero es cierto: la biología no sigue patrones exactos. Ninguno de los objetos anteriores era tan preciso como éste.

Estudiante 1: Ah, pero antes dijiste que no podíamos comparar porque no conocíamos ese planeta. A lo mejor es un planeta de formas perfectas.

Docente: Tienen razón. Pero haga lo que haga un objeto vivo, segu-

ramente esté expuesto al medio, y es muy posible que vaya sufriendo algún tipo de desgaste, por lo que si alguna vez tuvo formas perfectas, difícilmente las pueda mantener.

Estudiante 1: Ah, éstos eran objetos vivos muy jóvenes, y todavía no se habían desgastado...

Estudiante 2: ¡Son unos chantas!

Estudiante 1: No es todo. Si ponemos la oreja acá, hace ruido, y además podemos apretar el objeto y se mueve.

Docente: ¿Ésas son evidencias de que estaba vivo?

Estudiante 2: No, cualquier objeto puede hacer ruido o moverse.

Estudiante 1: Bueno, pero éste es más lindo...

Docente: ¿Y eso quién lo determina?

Estudiante 1: ¡Nosotros! Es simétrico, es lindo... y entonces viene de algo vivo.

Docente: ¿Ustedes quieren decir que fue parte de un organismo vivo o que fue fabricado por un organismo vivo?

Estudiante 1: Ehhhhhh... que lo hizo algo que estaba vivo, que la naturaleza sola no puede hacer un objeto así.

Docente: Pero ésa no era la consigna... Además, se pueden sorprender con las cosas que puede llegar a “fabricar” la naturaleza...

Estudiante 2: ¿Y todo esto para qué sirve?

Docente: ¿Qué querés decir?

Estudiante 2: Eso: ¿para qué sirve mirar algo y poder determinar si proviene de algo vivo?

Docente: El asunto es que aún no estamos de acuerdo en qué quiere decir exactamente que algo esté vivo o no. En este ejercicio estuvimos pasando lista a varias de las posturas y escuelas que han

discutido durante mucho tiempo. Algunas personas decían que lo vivo era totalmente diferente de lo no vivo (los vitalistas) y se les enfrentaron otras que decían que no, que la vida es muy parecida a las máquinas (los mecanicistas).

Estudiante 2: ¿Y quién ganó?

Docente: ¿Y quién ganó hoy en la clase?

Estudiante 1: Todo lo que fuimos diciendo estaba mal... que tenían una composición diferente, una forma especial...

Estudiante 2: Entonces, seguro que no somos vitalistas: no hay nada "especial" en la materia viviente.

Estudiante 1: ¿Pero esto lo estudian los biólogos actualmente? ¿Para qué?

Docente: Todos queremos saber si hay vida en otros planetas, ¿verdad? Hay una parte de la biología que se llama "exobiología" y estudia, justamente, las condiciones que harían posible la vida en la Tierra o en otros planetas y, también, cómo determinar si un objeto que podemos encontrar en una misión espacial proviene de un organismo vivo. La NASA dedica mucho personal y dinero a estas investigaciones.

CONCLUSIONES

En general, tanto la discusión interna como la presentación de las conclusiones resultan ser muy apasionadas. En la discusión final no se suele llegar a una definición concreta de lo viviente, sino a varias ideas aisladas, acercándose al concepto de que "lo vivo" no es una materia diferente, sino que es una organización especial de "lo no vivo".

Esta actividad tiene la virtud de que tanto en los grupos de tamaño reducido como en la discusión general se puede promover la participación de todos los estudiantes. La discusión guiada por el docente en forma de diálogo socrático es extremadamente útil para clarificar cualquier concepto a partir de las ideas de los alumnos. Resulta imprescindible que el docente se circunscriba a un papel de guía, y no "inunde" la discusión con datos y ar-

gumentos académicos. Asimismo, si los razonamientos son válidos y coherentes, el docente está obligado a aceptarlos (aunque luego pueda intentar brindar datos al respecto). En todo caso, el necesario complemento fáctico del tema en discusión puede ser brindado en una clase posterior.

La discusión puede llevar a otros conceptos además del de "materia viva". No es raro que se lleguen a considerar conceptos como simetría y belleza, por ejemplo, lo cual lleva indefectiblemente a un plano psicológico del conocimiento. Es interesante que los alumnos reconozcan que en la elaboración de la definición entran en juego concepciones netamente subjetivas.

La construcción histórica del conocimiento merece un tratamiento especial en esta actividad, recalcando que los conocimientos científicos no surgen espontáneamente sino a través de un largo proceso de pruebas y errores. La actividad da pie para que el docente retome el hilo y explique cómo se fue dando la discusión histórica sobre la materia viviente, y cómo se gestaron los bandos de vitalistas y mecanicistas.[5] Es importante reconocer que no todos los conceptos considerados válidos y aceptados en una disciplina científica lo son verdaderamente: en efecto, el objeto mismo de estudio de la biología, la materia viviente, no está completamente definido, incluso hasta nuestros días.

El conocimiento es, en definitiva, una aventura del pensamiento, y con esta actividad deseamos justamente recrear ese clima aventurero, esa asociación de ideas a partir de un objeto-enigma, que es finalmente el objetivo primordial de la ciencia: ser capaz de hacer y hacerse preguntas.

5. Para ilustrar este enfoque histórico, hemos encontrado muy útiles algunas historietas. Por ejemplo, ciertos capítulos de la saga de Asterix y Obelix (como "El adivino", "Los juegos olímpicos", "Asterix y Cleopatra") son muy adecuados para ambientar la historia de descubrimientos científicos.

Quinta Parte

El aspecto contraintituivo de la ciencia

13

SUPERANDO EL SENTIDO COMÚN

La ciencia busca generar descripciones y explicaciones precisas del universo y sus fenómenos. Para ello, parte del sentido común, es decir, de razonamientos simples basados en la lógica y la experiencia, que pasan luego por el filtro del consenso entre científicos. Cabría esperar entonces que el conocimiento científico sea claro y consistente con lo que nuestros sentidos nos dicen acerca del mundo. Sin embargo, esto no siempre es así: las formulaciones de la realidad que hace la ciencia muchas veces se vuelven complicadas, altamente abstractas, desafían profundamente nuestra percepción sensorial y entran en cortocircuito con nuestro sentido común. Éste es un aspecto de la ciencia del que generalmente se habla muy poco y constituye uno de los obstáculos más importantes cuando se enseña ciencia en las escuelas.

Veamos un ejemplo que, en su momento, causó un revuelo entre los docentes y desencadenó una serie de investigaciones que dieron origen a todo un campo de investigación sobre las dificultades que experimentan los alumnos en el aprendizaje de la ciencia. El ejemplo de marras salió publicado en la revista *Scientific American* de 1983: McCloskey, un psicólogo cognitivo que usaba conceptos científicos para estudiar procesos de aprendizaje, presentó una serie de preguntas a sus alumnos de la Universidad Johns Hopkins, Estados Unidos, con la siguiente pregunta como prototipo: “Si agito unas boleadoras haciendo círculos por encima de mi cabeza, ¿qué

trayectoria seguirán cuando suelte la soga de mi mano?". El 30% de los alumnos, que evidentemente no eran gauchos ni habían pasado mucho tiempo en el campo trabajando con animales, respondió que las bolas seguirían en su trayecto circular. La investigación muestra que la idea intuitiva de los alumnos es que una vez "inducido" el movimiento circular, éste se mantiene aunque se rompa el vínculo con el centro de rotación (la mano). Si se hace esta experiencia con las boleadoras, el resultado es que, al quebrarse el vínculo con la mano, las bolas se mueven en forma rectilínea según la tangente al círculo que estaban describiendo. Esto no es más que una manifestación de la ley general que establece que los objetos tienden a moverse en línea recta y a velocidad constante a menos que interactúen de alguna manera con otros. La noción de que las bolas se escapan por la tangente parece ser, entonces, contraintuitiva para los alumnos.

Es llamativo que, de acuerdo con esta y otras investigaciones que presentan resultados similares, las ideas de los estudiantes (expresadas en la resolución de los problemas y en entrevistas individuales) son muy similares a las concepciones científicas prenewtonianas de los siglos XIV al XVI y tienen elementos en común con la física de Aristóteles. Quizá no debiera sorprendernos que un estudiante principiante y un científico de hace varios siglos interpreten el mundo que los rodea en forma parecida. En definitiva, las leyes de Newton no tienen nada de intuitivas. Y lo mismo se puede decir de muchos conceptos que, a lo largo de la historia de la ciencia, resultaban contraintuitivos para los propios científicos de la época.

CONCEPTOS CONTRAINTUITIVOS

El historiador Daniel J. Boorstin sostiene que la ciencia como tal comenzó cuando el ser humano cortó las cadenas que lo mantenían atado al sentido común (Boorstin, 1986). De acuerdo con este autor, el primer gran desafío fueron las ideas copernicanas de que la Tierra se mueve alrededor del Sol. ¿Quién, acaso, puede sentir el movimiento de la Tierra bajo sus pies? La única razón por la que aceptamos sin cuestionamiento que la Tierra se mueve es porque nos enseñan a pensar de esa manera desde edades tempranas. El sentido común de los griegos les decía que la Tierra estaba inmóvil; de otra manera, argüían, grandes vientos arrasarían con todo. Incluso en el siglo XVII Galileo debió hacer un enorme esfuerzo para tratar de convencer a las mentes más distinguidas de la época de que, aunque resultara contraintuitivo, la Tierra se movía. Si la Tierra estuviera en movimiento, argumentaba Galileo, no-

sotros no podríamos sentir ese movimiento y nos parecería que está quieta, simplemente porque nos movemos con ella.

Para llegar a esta idea, Galileo concibió que los objetos tienden a moverse eternamente a menos que algo los detenga. Imaginó muchas situaciones para ilustrar esta idea; por ejemplo, si estamos cabalgando y lanzamos una pelota hacia arriba, ésta caerá de nuevo en nuestras manos y no a nuestras espaldas, precisamente porque comparte nuestro movimiento; lo mismo sucede cuando dejamos caer una bola desde la punta del mástil de un barco en movimiento: la bola cae al pie del mástil y no en el mar detrás del barco.[1] Esto es lo que ahora llamamos el principio de inercia,[2] también profundamente contraintuitivo. ¿Quién diría, por ejemplo, que una bola echada a rodar continuará así para siempre? El genio de Galileo consistió en suprimir mentalmente los efectos de la fricción, imaginando una bola rodando por una superficie perfectamente pulida, sin rozamiento alguno. Ésta es una situación extrema inexistente; imaginarla constituye una forma de razonar (típica de Galileo y de los científicos modernos) que no es habitual en la vida cotidiana.

Galileo mismo reconoció que sus ideas y su forma de pensar eran extrañas y difíciles para sus contemporáneos. Así es que las presentó en un libro, *Diálogo acerca de dos nuevas ciencias* (1632), en la forma de discusiones y diálogos vivaces entre tres interlocutores. Simplicio[3] representa el punto de vista aristotélico, Salviati presenta el punto de vista de Galileo y Sagredo es el prototipo de un lego inteligente e interesado en la discusión pero que no tiene partido tomado *a priori* ni por las ideas de Simplicio ni por las de Salviati. En las conversaciones entre los tres, Salviati usa el diálogo socrático para guiar a sus interlocutores hacia las ideas de Galileo.[4] Al leer a Galileo

1. Otro ejemplo fue propuesto por nuestros estudiantes luego de tirarse por una tirolesa (un arnés sujeto a una soga en declive). Para comprobar este principio, dejaron caer piedras mientras se deslizaban por la tirolesa y, además de comprobar dónde caían las piedras, realizaron filmaciones sencillas del hecho a fin de efectuar un análisis posterior.

2. Este principio fue expresado por primera vez por Galileo en su libro *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo* (1632) y luego acuñado por Newton como su primera ley del movimiento.

3. El nombre fue tomado de un filósofo de la Antigüedad y no implica puntos de vista simples.

4. Vemos aquí ilustrados por Galileo dos aspectos a los que nos referimos con anterioridad: a. El uso del diálogo socrático para educar al interlocutor ingenuo. b. El esfuerzo desplegado para convencer a sus contemporáneos de sus ideas, o sea, el aspecto social de la ciencia que vuelve imprescindible el reclutamiento de adherentes a su forma de pensar.

puede apreciarse el enorme esfuerzo de persuasión desplegado por el autor para defender ideas que evidentemente son difíciles de aceptar (así que cuando, como docentes, usamos el diálogo socrático, podemos sentirnos bien acompañados).

La idea formulada por Galileo de que los cuerpos se mueven eternamente en ausencia de fuerzas externas fue retomada por Newton, quien concentró su pensamiento en la naturaleza de esas fuerzas. Newton postuló que las fuerzas no producen movimiento, sino *cambios* en el movimiento. ¡Otro caso de un concepto contraintuitivo! Pero las ideas de Newton tenían un poder descriptivo y predictivo de vastísimo alcance y fueron aceptadas por los científicos del siglo XVIII sin mucha vacilación. Aun así resultó complicado reconsiderar lo que el sentido común indicaba, para dar lugar a un nuevo sistema de conocimiento que pudiera acomodar todas las observaciones. Este camino fue trabajoso y difícil para el mismo Newton.[5]

Estas dificultades son prácticamente las mismas que encuentra un alumno que aprende mecánica. Muchos estudiantes empiezan aferrándose a ideas aristotélicas (que los objetos tienen movimientos "propios" o "naturales"), luego desarrollan conceptos típicos de la Edad Media (como la idea de que existen fuerzas internas al objeto o tendencias internas[6] a moverse) y es sólo después de un fuerte entrenamiento que logran pasar por las ideas de Galileo y llegar a comprender la mecánica newtoniana (Piaget y García, 1982).[7]

El desafío al sentido común sigue a lo largo de la historia de la física. ¿Cómo puede ser que la luz se propague en el vacío? ¿Dónde se ha visto una onda que no necesite un medio material para ondular? ¿Y que un electrón

5. Véase el interesante ensayo de Steinberg y Brown (1990) sobre este tema.

6. A estas tendencias se les daba el nombre de "ímpetus".

7. El curioso paralelo entre la evolución histórica de las ideas científicas y la evolución de las ideas de un estudiante adulto o de un niño en etapa de desarrollo es un tema interesantísimo tratado en el libro *Ontogeny, Phylogeny and Historical Development*, editado por S. Strauss (1988). En uno de los capítulos, M. McCloskey se refiere al uso de modelos históricos en el estudio de la física no intuitiva. En otro, M. Wiser habla de la diferenciación entre los conceptos de "calor" y de "temperatura" en la historia de la ciencia y compara el desarrollo de esa diferenciación con el proceso mental observado a medida que un novicio (alguien no iniciado en el tema) se va convirtiendo en un experto. Se puede apreciar, en ese estudio, que la diferencia entre temperatura y calor no es para nada intuitiva.

emita radiación en forma cuantificada y no en forma continua? ¿Cómo puede ser que la estructura microscópica de la materia obedezca a reglas de probabilidad? El mismo Einstein encontró esta última idea tan contraintuitiva que nunca la aceptó: “Dios no juega a los dados”, se dice que dijo.

Estas y otras ideas contraintuitivas fueron surgiendo como consecuencia de explicaciones de fenómenos observados y de experimentos. Por ejemplo, el postulado de que la luz vibra en el vacío es consecuencia del resultado negativo de la búsqueda del “éter”, el medio material en que se suponía vibraba la luz. La teoría cuántica se desarrolló para explicar, entre otras cosas, la luz emitida por los átomos.

Las ideas contraintuitivas están presentes en todas las ramas de la ciencia. En química, por ejemplo, existen ideas contraintuitivas como la que postula que los gases tienen peso o que volúmenes iguales de gases diferentes tienen el mismo número de partículas. Por mucho tiempo la idea misma de que existen átomos resultó poco convincente para la comunidad científica. En geología, el movimiento de los continentes como consecuencia del nuevo suelo que se va generando debajo de los océanos resultó contraintuitivo para los científicos de la época. En biología costó concebir la idea de selección natural o aceptar que los sistemas biológicos están compuestos de los mismos elementos que los sistemas no vivos y obedecen a las mismas leyes físicas y químicas.

FORMAS DE PENSAR NO HABITUALES

Las ideas que nos resultan contraintuitivas surgen con frecuencia a través de formas de pensar que no son habituales en la vida cotidiana. El físico Alan Cromer (1993) y el biólogo Lewis Wolpert (1992) proponen con persuasivos argumentos que las formas de pensar típicas de la ciencia no son aquellas a las que nuestras mentes son más propensas o a las que están más acostumbradas. El sentido común y las formas cotidianas de pensar, sostienen estos autores, no coinciden con el pensamiento lógico, el diseño correcto de experimentos o las formas de análisis de resultados propias de la ciencia.

Según señala Wolpert, el pensamiento cotidiano y el científico difieren en varias características. La vida diaria no requiere necesariamente una lógica muy estricta, mientras que la ciencia se basa (siguiendo una tradición que se remonta a los griegos) en un riguroso ejercicio del razonamiento

lógico.[8] El pensamiento científico busca ser objetivo, mientras que el pensamiento cotidiano está repleto de consideraciones subjetivas. Las generalizaciones o leyes naturales se construyen en ciencia sobre la base de numerosas observaciones, cada una de las cuales aporta su granito de arena. En la vida cotidiana, en cambio, basamos muchas de nuestras conclusiones en algunos pocos casos con enorme peso afectivo. Mientras que las explicaciones en el mundo científico buscan ser completas, libres de contradicciones y detalladas, las explicaciones que ofrecemos y aceptamos en el día a día pueden ser sumamente vagas y poseer graves inconsistencias internas.

Varias de las herramientas del pensamiento científico son extrañas al pensamiento cotidiano (ya hemos visto, en el caso de Galileo, la forma de razonar yendo a los límites de una variable). Así, el uso de la metodología científica suele estar ausente en las conversaciones cotidianas (por ejemplo, nos hablan de un remedio muy eficaz que curó de achaques a varias personas conocidas, pero ¿cómo descartar que esas personas se hubieran curado en el mismo plazo *sin* el remedio?, ¿dónde están los controles?). Asimismo, el manejo estadístico de datos generalmente queda fuera de la forma de pensar habitual. Stephen J. Gould, en su maravilloso libro *La grandeza de la vida*[9] (2001), examina algunos de los errores que esto ocasiona. Por ejemplo, si observamos dos cosas que cambian en el mismo sentido, asumimos que una debe ser la causa de la otra; en otras palabras, imaginamos causalidad cuando sólo vemos correlación. También asumimos que existen tendencias en hechos puramente azarosos. Por ejemplo, si alguien tira una moneda y saca cara seis veces seguidas, pensaremos que está haciendo trampa; pero la seguidilla, aunque sumamente improbable, es totalmente posible.[10] Gould sostiene también

8. Imaginemos, por ejemplo, el siguiente problema. “En un cuarto hay biólogos, arqueólogos y jugadores de ajedrez. Si ninguno de los arqueólogos es un biólogo y todos los biólogos son jugadores de ajedrez, ¿qué podemos inferir válidamente acerca de este grupo de personas que no haya sido explicitado en las premisas?”. Muy pocas personas recorren una ruta lógica de pensamiento. La única inferencia válida es que “algunos jugadores de ajedrez no son arqueólogos”. Uno estaría tentado a pensar que ningún arqueólogo es jugador de ajedrez pero esto no es necesariamente así: la aseveración carece de fundamento. Los silogismos y las estructuras lógicas formales, parece ser, no surgen espontáneamente en las personas y, de hecho, no son las formas en las cuales tendemos naturalmente a pensar.

9. El título en inglés es *Full House. The Spread of Excellence from Plato to Darwin*.

10. Es común escuchar a gente quejarse de que no ha llovido a pesar de que el pronóstico meteorológico decía claramente que las probabilidades de chaparrones eran del 85%. Esto no quiere decir que el servicio meteorológico “no la pegó”. Según el pronóstico, no era imposible que no lloviera, sino sólo probable en un 15%. Así también mucha gente piensa que una moneda que se arroja y cae seis veces consecutivas en “cara” tiene más probabilidad de salir “ceca” en la tirada siguiente. Esto es conocido como la “falacia de apostador”.

que nuestras mentes tienden a pensar en términos de promedios e ideas simples, rehusándose a concebir la variabilidad y dispersión intrínseca de los fenómenos y sistemas naturales. En su libro relata que cuando tenía cuarenta años le diagnosticaron un raro cáncer. Las estadísticas decían que, en promedio, los pacientes vivían dieciocho meses después del diagnóstico. ¿Cabía alguna esperanza para él? ¡Sí! Si bien el promedio de sobrevida era corto, los datos mostraban una curva de distribución asintótica en el tiempo. Eso quería decir que muchos morían tempranamente, pero algunos vivían más y unos pocos vivían mucho. Las ideas de variabilidad y dispersión (ideas críticas en su trabajo como biólogo evolutivo) le dieron a Gould renovadas esperanzas. De hecho, vivió mucho más de lo pronosticado por el promedio.

Todos estos ejemplos apuntan a la idea de que las formas de pensar propias de la ciencia no son necesariamente las que encontramos en el pensamiento basado en el sentido común, y que muchas veces ambos tipos de razonamientos difieren o se oponen. Cromer (1993) argumenta que las formas científicas de pensamiento son tan ajenas a la naturaleza humana que sólo aparecieron una vez en el desarrollo cultural de la humanidad. Surgieron en la Antigua Grecia, y luego fueron transmitidas por los árabes a la Europa del Renacimiento. Ninguna otra cultura fuera de la griega (por más admirables que sean sus adelantos científicos), mantiene Cromer, desarrolló el sistema de pensamiento científico.

Pero ya sea que aceptemos esta interpretación provocativa de la historia de la ciencia o no, el estudio y la comparación cuidadosa de las ideas y formas de pensar cotidianas y científicas indican que el pensamiento científico no aparece espontáneamente en el desarrollo cognitivo de los seres humanos. Esto, por supuesto, tiene profundas consecuencias educativas. Si el pensamiento científico no surge espontáneamente, entonces debe ser adquirido por instrucción y a través del entrenamiento y modelado por parte de aquellos que ya lo han adquirido. Esta aseveración, aunque está reñida con un constructivismo extremo, nos sugiere que el mejor enfoque para la enseñanza de las ciencias está basado en la exploración, el descubrimiento y la construcción de ideas por parte del estudiante, pero altamente guiado por el docente.

FENÓMENOS DISCREPANTES

Hemos visto que la ciencia genera ideas contraintuitivas, es decir, explicaciones y teorías que no cuajan con lo que nos muestran los sentidos. A la

inversa: también pueden darse fenómenos que resultan contraintiuitivos porque no cuadran con las ideas que el observador se ha hecho del mundo. A estos fenómenos los llamamos "discrepantes" porque al observador le parece que no deberían suceder, o que deberían darse de otra forma. En suma, decimos que un fenómeno es discrepante cuando nuestra interpretación vigente no lo explica.[11]

Hemos visto un ejemplo de esto en el fenómeno de dispersión de las partículas alfa que fue determinante en el paso del modelo atómico de Thomson al de Rutherford.[12] También fue discrepante el oscurecimiento de las placas fotográficas que Becquerel guardaba en un cajón, y que derivó en el descubrimiento de la radiactividad. Otro ejemplo es la existencia de los pinzones hallados por Darwin, sorpresivamente distintos en diferentes islas cercanas entre sí, que constituyó un elemento fundamental en la formulación de la teoría de la selección natural.

En el caso de individuos que no conocen las explicaciones científicas de un fenómeno, la "interpretación vigente" de ese fenómeno es el esquema explicativo que surge de su experiencia personal. Así, imaginemos un chico cuya experiencia dice que lo que tiene en la mano cae para abajo si lo suelta. Si a este chico se le da un globo inflado con helio, se va a sorprender sobremanera cuando lo suelte y lo vea irse para arriba. El globo inflado con helio que sube cuando se lo suelta no entra dentro de su sistema explicativo personal. Para este chico, el globo que sube es un fenómeno discrepante.

Veamos otro ejemplo basado en un módulo popular de los museos interactivos. En un cuarto oscuro hay un pequeñísimo agujero en la pared delantera, por el que se ven, proyectadas en la pared del fondo, imágenes de la gente que pasa. Las imágenes aparecen invertidas, con la gente patas para arriba. Esto es divertido pero no sorpresivo para quien tiene experiencia con cámaras fotográficas de apertura "cabeza de alfiler" o para quien sabe hacer un trazado geométrico de los rayos de luz a través del agujero. Por el contrario, el efecto es discrepante para quienes tienen la idea de que las imágenes pasan enteras a través del agujero (no es inusual esta idea de que las imágenes se hacen pequeñas para pasar a través del agujero y luego se agrandan otra vez del otro lado, sin invertirse).[13]

11. En el capítulo 1 hemos sugerido el uso de fenómenos discrepantes para llamar la atención de los alumnos sobre observaciones que no cuadran con su sentido común y generar así la necesidad de explicarlas.

12. Véase capítulo 7.

13. Ahondaremos en el tema de las imágenes en el capítulo 14.

La lección importante impartida por estos ejemplos es que un fenómeno puede ser sorpresivo o no según el sistema explicativo que se use. Esto resulta relevante cuando se trata de trabajar con las preconcepciones[14] de los alumnos, como veremos a continuación.

LAS PRECONCEPCIONES DE LOS ALUMNOS

El sistema explicativo personal que usa un alumno es el que define si un fenómeno le resultará sorpresivo o no. Cada alumno lleva consigo sus propios sistemas explicativos que dan sentido al mundo que lo rodea, lo cual implica que llega al aula equipado con ideas que pueden o no coincidir con las que el docente quiere enseñar. Esta noción (que suplanta a la vieja idea del alumno como cerebro en blanco o *tabula rasa*) cobró fuerza a partir de 1980[15] cuando comenzó a desarrollarse todo un campo de investigación dedicado a la adquisición de conceptos en las ciencias.[16]

Los primeros estudios se concentraron en el aprendizaje de conceptos físicos por parte de estudiantes, usando principalmente métodos cualitativos (por ejemplo, la técnica de entrevistas usada en los estudios clásicos de Jean Piaget), y luego se extendieron al aprendizaje de otras disciplinas como la química o la biología.[17]

Las investigaciones han generado gran cantidad de trabajos que documentan las concepciones de los alumnos que no concuerdan con las con-

14. "Preconcepciones" es el nombre dado a las ideas de un alumno previas a la lección en el aula.

15. La idea de *tabula rasa* ya había sido desafiada numerosas veces con anterioridad. Véanse por ejemplo las investigaciones de Jean Piaget (1934), que mostraban que los niños aprenden poniendo en juego esquemas propios de pensamiento en interacción con el medio, y las ideas de John Dewey (1938) a favor de una enseñanza basada en el aprendizaje activo y la resolución de problemas.

16. Los investigadores involucrados eran (y siguen siendo) en su mayoría científicos con gran dedicación a la docencia y científicos cognitivos.

17. La elección de una ciencia exacta como la física para estos estudios no es casual: se debe a la estructura altamente conceptual de la disciplina, y al hecho de que su misma simplicidad hace que sea difícil para los alumnos. La simplicidad de la disciplina reside en que explica un sinnúmero de fenómenos con un puñado de leyes y teorías (y aspira continuamente a reducir el tamaño de ese puñado). La dificultad para la mente no entrenada yace, justamente, en el poder de síntesis de la disciplina, que reduce la complejidad del mundo natural a un pequeño número de ideas poderosas.

cepciones científicamente válidas y entorpecen el aprendizaje. Estas concepciones de los alumnos se han calificado a veces de “erróneas”, a veces de “ingenuas” y a veces de “previas a la enseñanza formal” o “preconcepciones”. Las preconcepciones descriptas en ese cúmulo de trabajos se han encontrado en diversas culturas y en un número importante de estudiantes, lo que revela que se trata de algo sumamente extendido. Los estudios han mostrado que las preconcepciones son fuertemente persistentes y que se las encuentra en mayor o menor medida tanto en estudiantes adolescentes de nivel secundario como en estudiantes universitarios, incluso de carreras científicas.

Algunas investigaciones han mostrado que los alumnos tienen problemas con muchos de los conceptos fundamentales de la mecánica newtoniana, ya que, por ejemplo, atribuyen fuerzas a movimientos sin aceleración, confunden la aceleración con la velocidad, fallan en identificar pares de acción-reacción (tercera ley de Newton), y tienen serias dificultades para desarrollar las ideas de trabajo y energía, entre otras (McDermott, 1984). Los estudiantes de química conciben los gases como sustancias materiales pero tienen graves confusiones al atribuir peso o masa a un gas (Furio Mas *et al.*, 1987). Esta concepción errónea impide una comprensión profunda del principio de la conservación de la masa y vicia gran parte del razonamiento básico de la química elemental. En biología es común que los estudiantes tengan problemas para capturar la idea de selección natural y sigan pensando en términos de herencia de caracteres adquiridos aún después de haber estudiado a Darwin en profundidad (Brumby, 1979). Howard Gardner en su libro *La mente no escolarizada* (1997) sostiene que en todas las disciplinas, no sólo las científicas, existen preconcepciones fuertemente arraigadas.

¿CÓMO PROMOVER EL CAMBIO EN LAS PRECONCEPCIONES DE LOS ALUMNOS?

Además de documentar las preconcepciones de los alumnos y las trabas que ocasionan en el aprendizaje, algunos investigadores se han abocado a la tarea de encontrar formas de enseñanza que permitan a los estudiantes aprender conceptos que desafían sus ideas previas. La investigación en esta área sugiere que los alumnos no aprenden lo que choca con sus creencias personales. Por ello la instrucción tradicional, basada en exposiciones tanto orales como escritas de conceptos y teorías científicas, es incapaz de eliminar las preconcepciones que dificultan el aprendizaje y reemplazarlas por

los conceptos que se quiere enseñar. Se requiere otra forma de encarar la labor en el aula, diseñada específicamente para resolver los problemas planteados por las preconcepciones, que conduzca al cambio conceptual.

Una de las razones fundamentales por las que la enseñanza declarativa da resultados pobres es que en ningún momento brinda la oportunidad a los estudiantes de tomar conciencia de sus propias concepciones de la realidad y enfrentarlas con resultados que las desafíen. Sin oportunidades de esta naturaleza, los estudiantes seguirán trabajando bajo las premisas de su sentido común ordinario. Es decir, sabemos que el alumno no es una *tabula rasa* en la que el docente escribe las ideas que quiere enseñar, pero además necesitamos entender que el docente tampoco puede borrar lo que ya viene escrito previamente, ni escribir encima.[18]

Una buena técnica para lograr que los alumnos tomen conciencia de sus propias concepciones consiste en pedirles que predigan los resultados de un experimento o una observación (como el caso de las boleadoras citado más arriba)[19] o que expongan sus interpretaciones de los fenómenos observados. Como hemos dicho, estas predicciones y explicaciones son fruto de la experiencia personal e intuición de los alumnos y es necesario reconocer su existencia –aunque difieran de las explicaciones científicas aceptadas en la actualidad– para luego desafiarlas. Justamente, las explicaciones de los alumnos dan al docente la pauta de por dónde debe empezar a enseñar las ideas consensuadas por la comunidad científica. La tarea del docente consiste en ayudar al alumno a pasar del planteo ingenuo al más sofisticado.

Una vez identificadas claramente las preconcepciones que dificultan el aprendizaje (vale aclarar que no todas las ideas en una clase de ciencias encuentran obstáculos de este tipo), el docente se enfrenta al problema pedagógico de cómo facilitar la transición a la concepción científica que se

18. Este punto está estupendamente ilustrado en el corto cinematográfico *A Private Universe* (Schneps, 1987) en el que se muestran entrevistas a estudiantes secundarios y a graduados de la Universidad de Harvard, quienes, a pesar de su ilustre formación, sostienen "teorías" insostenibles.

19. Una modificación útil de este experimento consiste en armar un cilindro con una "ventana" recortada en su base. Nosotros hemos usado un botellón plástico de agua de 20 litros cuya base fue recortada. El cilindro se apoya en una superficie plana horizontal y en su interior se hace impulsar una bolita de rulemán. La bolita se desplaza por la pared interna del cilindro hasta que llega a la "ventana". Allí el docente detiene la bolita y le pide a cada uno de los estudiantes que dibuje en el piso o en la superficie donde descansa el cilindro cuál es la trayectoria que predice que tomará la bolita. Esta técnica fomenta la discusión y el debate, y además sus resultados son contundentes.

quiere enseñar. El cambio de una concepción a otra estará catalizado, en primer lugar, por la experiencia personal del estudiante. Aquí es donde empiezan a jugar un papel importante los fenómenos discrepantes, aquellos que susciten una contradicción evidente con las ideas previas de los alumnos y requieran su reestructuración. El docente deberá elegir con cuidado, por lo tanto, experiencias de laboratorio, demostraciones, juegos o exploraciones en los que los estudiantes se encuentren con estos fenómenos. Una vez que esto suceda, el docente deberá provocar discusiones conducentes a explicitar el desconcierto generado por la violación de las expectativas de los alumnos de manera de facilitar el reacomodo de las concepciones. Muchas de las ideas discutidas en el capítulo 1 acerca del aspecto empírico de la ciencia brindan estas oportunidades. Por otra parte, el diálogo, la discusión y la verbalización por parte de los estudiantes juegan roles fundamentales en el cambio de concepciones. Las ideas discutidas en el capítulo 10 acerca del aspecto social de la ciencia también pueden ser aplicadas a estos fines.

Por último, gran parte de los esfuerzos de la investigación en didáctica se concentra en determinar secuencias adecuadas para el desarrollo de conceptos particulares, algo que bien podríamos llamar la "microdidáctica" de cada tema. Las secuencias, los experimentos y los enfoques diseñados son puestos a prueba por docentes y reformulados a la luz de los resultados de su aplicación en el aula, en un proceso continuo de refinamiento llevado a cabo en conjunto entre los docentes y los investigadores. En la enseñanza de la física, el texto de Arnold B. Arons (1997b) es francamente iluminador en este sentido. En él se aprecia cómo la microdidáctica tiene un impacto profundo en el aprendizaje de los jóvenes.

En el apartado a continuación recapitulamos las prácticas pedagógicas sugeridas en este capítulo. En los dos capítulos que siguen daremos ejemplos de actividades que las ilustran. En el capítulo 14 propondremos la utilización de fenómenos de formación de imágenes y sombras para indagar, por medio de las predicciones de los alumnos, cuáles son sus ideas sobre la propagación de la luz. En estas experiencias los enfrentamos con fenómenos discrepantes y les pedimos que los expliquen, de manera que sus preconcepciones queden explicitadas y confrontadas y que las ideas científicas que les resultan contraintuitivas queden claras. En el capítulo 15 el hincapié estará puesto en el proceso de enseñanza de los conceptos de fuerza e inercia que –como sabe la mayor parte de los docentes de física– son contraintuitivos y notoriamente difíciles de enseñar.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO CONTRAINTUITIVO DE LA CIENCIA

- Reconocer explícitamente el carácter contraintuitivo de algunas ideas científicas e ilustrarlo con casos históricos.
- Dar oportunidad a los alumnos para que expliciten y tomen conciencia de las ideas que traen a clase sobre el tema a encarar.
- Buscar fenómenos, situaciones o experimentos discrepantes que pongan de manifiesto la contradicción entre las preconcepciones de los estudiantes y los resultados científicos consensuados.
- Usar la técnica de pedir predicciones y explicación de las predicciones, y luego contrastar la predicción con lo que sucede. Si fuera necesario, lograr que el alumno cambie su explicación incorporando la nueva evidencia.

14

SOMBRAS E IMÁGENES: EXPLICITACIÓN Y CONFRONTACIÓN DE PRECONCEPCIONES

Hay temas, como la óptica geométrica, que a primera vista parecen ser conceptualmente simples y, por lo tanto, sencillos de enseñar. Sin embargo, veinte años de investigación sobre las ideas de los alumnos muestran que aun la óptica geométrica tiene sus bemoles ya que, con frecuencia, los estudiantes llegan al aula con ideas poco claras o erróneas sobre la naturaleza de la luz y el mecanismo por el cual vemos imágenes y sombras.[1]

Tomemos, por ejemplo, el concepto de que para ver un objeto es necesario que haya una fuente de luz cuyos rayos, reflejados por el objeto, lleguen a nuestros ojos. Es común que los alumnos den explicaciones que sólo involucran a los ojos y al objeto, a las que un docente poco precavido puede interpretar como explicaciones parcialmente correctas. Pero al profundizar, frecuentemente se encuentra la idea de que los objetos poseen una imagen íntegra que se empequeñece hasta caber en el ojo receptor. También es habitual la idea de un ojo activo que "apresa" la imagen del objeto, a través de un mecanismo como el de los rayos emitidos por el ojo de Superman (cuando utiliza su visión de rayos X) para ver el objeto. Combinando ambas ideas, algunos alumnos conciben un proceso dual en que la imagen sale del objeto y es apresada por el ojo. En estas ideas, la luz no aparece en forma explícita;

1. Véase, por ejemplo, Andersson y Kärrquvist (1983), Goldberg y McDermott (1987), y Guesne (1985).

indagando más, se colige que presuponen que la luz es una especie de medio homogéneo pasivo dentro del cual operan los mecanismos ojo-objeto.

Si esto parece estrambótico, comparemos las ideas de los no iniciados en la materia con las ideas desarrolladas a lo largo de la historia acerca de estos temas. Las primeras explicaciones provienen de la época de los griegos y se dividen en dos escuelas: la de los "intromisionistas" (a la que pertenecen Epicuro y Lucrecio), que suponen que una *eidola* (imagen) del objeto llega a nuestros ojos, y la de los "emisionistas" (como Pitágoras, Euclides y Platón), que postulan que algo (un efluvio) sale del ojo y apresa el color y la forma del objeto. Otros (como Aristóteles y Empédocles) adherían a la idea de los dos flujos, uno que va del ojo al objeto y otro que va del objeto al ojo.

Más adelante, en la Edad Media, los árabes desarrollaron la idea, basada en sus conocimientos de la anatomía del ojo, de que algo más tangible que una mera imagen o un sutil efluvio debía entrar en el ojo. Así aparece la concepción, que todavía circulaba en el siglo XVI, de una luz activa, la cual, al dar contra un objeto, estimulaba la emisión de una imagen que luego viajaba hacia el ojo en los rayos de luz como si fuera sobre rieles. Este rol de la luz como disparadora o gatillo nos ocupará también a nosotros más adelante.

Recién con Kepler, en su libro *Doptrice*, aparece la explicación que usamos hoy en día, considerando las propiedades de reflexión y refracción de la luz para explicar cómo se forma una imagen del objeto, punto por punto, en la retina del ojo receptor. Esta explicación en términos únicamente de la luz y sus propiedades fue revolucionaria en su momento y terminó con la idea de una imagen que se desprende del objeto y llega al ojo del observador. Por fin se entendía en forma clara el rol de la luz, el objeto y el receptor. Usando el lenguaje de las ciencias cognitivas, el modelo esbozado por Kepler en 1610 es lo que llamaríamos el modelo "experto", a diferencia de los modelos ingenuos de los novicios en el tema.

Las ideas de los niños sobre cómo se forman las sombras han sido objeto de estudio para Piaget (1934). Sucede que en muchos adultos aparecen residuos de estas ideas infantiles. Por ejemplo, en algunos adultos subsiste la idea de que la sombra es un ente que pertenece al objeto y se traslada con él, o que la sombra "huye del Sol" y por eso se encuentra siempre del otro lado del objeto con respecto al Sol (o a la fuente de luz). Según nuestra experiencia, si bien los adultos entienden que la sombra aparece en los lugares a los que el sol no llega, notamos que con frecuen-

cia no pueden –o no saben– hacer la construcción geométrica que permite predecir el largo de su propia sombra en función de la altura del Sol en el cielo. En nuestras clases de astronomía con estudiantes de primer año del ciclo básico universitario comprobamos frecuentemente que los alumnos tienen dificultades con la formación de sombra (*umbra*) y penumbra durante un eclipse. Se puede constatar que esta dificultad tiene su origen en la idea incorrecta de que de cada punto de la fuente luminosa sale un rayo de luz y sólo uno.

LAS IDEAS CONTRAINTUITIVAS SOBRE LA LUZ

Como comentamos en el capítulo anterior, ciertos conceptos que a los docentes nos pueden parecer evidentes y simples, para muchos alumnos son contraintuitivos. En el caso de la formación de imágenes, por ejemplo, es común que a los estudiantes les resulte contraintuitivo que de cada punto de la fuente luminosa emanen rayos en todas las direcciones. En efecto, algunos alumnos postulan que emana un solo rayo, en una dirección preferencial –lo que sería una especie de propagación con un fin determinado, como si el rayo supiera dónde está la apertura por la que tiene que pasar para llegar a la pantalla…–. En el caso de las sombras, frecuentemente les resulta contraintuitivo que una sombra sea la contraparte de una imagen (es decir, una anti-imagen) y no un ente ligado estrictamente a un objeto.

En tanto los estudiantes reemplazan los conceptos que les son contraintuitivos con otros más cercanos a su propia intuición, el docente se encuentra frente a barreras que dificultan el aprendizaje en formas insidiosas. Para superar este problema, como hemos insistido con anterioridad (véase el capítulo 13), es conveniente e importante un manejo tripartito de la situación, empezando por ayudar a los alumnos a reformular sus concepciones, siguiendo con la demostración de fenómenos discrepantes para evidenciar que esas preconcepciones son inadecuadas (por cuanto no llevan a predicciones correctas de los fenómenos) y, a partir de allí, haciendo hincapié en las explicaciones científicamente válidas que sí predicen las observaciones correctamente.

En este capítulo proponemos una serie de actividades que sirven tanto para hacer explícitas las ideas de los alumnos como para confrontarlas cuando no son adecuadas. Mediante predicciones sobre los resultados de una demostración, los alumnos definen su postura y su forma de pensar sobre el

tema y, cuando el docente demuestra los efectos para comprobar las predicciones, los fenómenos discrepantes aparecen en forma vívida.

HACIENDO EXPLÍCITAS LAS NOCIONES DE LOS ALUMNOS MEDIANTE PREDICCIONES

¿Cómo nos enteramos de qué piensan los alumnos? ¿Cómo logramos que hagan explícitas sus ideas sobre la formación de sombras e imágenes? Sabemos que, si los alumnos parten de ideas incorrectas y el docente no procede en forma activa para volverlas explícitas y confrontarlas, es seguro que tropezarán con verdaderos problemas al estudiar otros temas, como por ejemplo la acción de las lentes (véase Goldberg y McDermott, 1987). Para poner de manifiesto las ideas de los estudiantes sobre la propagación de la luz, hemos desarrollado una serie de actividades en las que les solicitamos que predigan resultados y expliquen sus predicciones. Los resultados de estas actividades dan un buen diagnóstico de cómo concibe cada alumno la propagación de la luz (Feher, 1990). Este diagnóstico permite al docente identificar las nociones que, por ser contraintuitivas para los alumnos, deben ser enseñadas en forma cuidadosa. Para el alumno, advertir que sus ideas no coinciden con la realidad tiene un doble beneficio: es un primer paso para modificar esas ideas y elaborar nuevos y más adecuados modelos, y además sirve para que comprenda mejor cuán arduo es el derrotero de la ciencia misma, que debe lidiar constantemente con resultados sorprendentes.

ACTIVIDADES CON IMÁGENES Y SOMBRAS

Las actividades que describimos a continuación son muy simples de organizar, y las explicaciones de los fenómenos observados no requieren nociones previas sobre reflexión ni refracción, sino que únicamente invocan la propagación rectilínea de la luz.

Los problemas que sugerimos plantear a los alumnos consisten en predecir y explicar lo que se verá en una pantalla cuando se la ilumina con una fuente de luz y se intercalan aperturas (ventanas) y objetos (obstáculos) entre la luz y la pantalla. El quid de la cuestión es que la fuente de luz tenga forma definida y que la luz no sea difusa. La fuente de luz puede ser el filamento de una lamparita incandescente no esmerilada. En nuestras cla-

ses hemos usado dos tubitos fluorescentes perpendiculares, formando una cruz. De aquí en adelante, para facilitar la discusión, supondremos que la fuente de luz tiene, justamente, forma de cruz.

El docente usará los materiales a modo de demostración y pedirá a los alumnos que contesten sus preguntas con predicciones, acompañándolas con dibujos y explicaciones. Las preguntas a contestar son las siguientes:

Formación de imágenes y de sombras

Contestá a modo de predicción cada una de las preguntas siguientes. Acompañá cada predicción con dibujos que muestren qué sucede entre la fuente de luz y la pantalla y, en cada caso, explicá cómo se forma la imagen o la sombra.

1. ¿Qué vas a ver en la pantalla si prendo esta luz (en forma de cruz)?
2. ¿Qué vas a ver en la pantalla si prendo la luz y pongo una cartulina con un agujero grande redondo entre la luz y la pantalla?
3. ¿Qué vas a ver en la pantalla si en vez de la cartulina con el agujero grande pongo otra con un agujero pequeño?
4. ¿Qué vas a ver en la pantalla si enciendo la luz y cuelgo esta cuenta (o bolita) a mitad de camino entre la fuente de luz y la pantalla?
5. ¿Qué vas a ver en la pantalla si cambio la cuenta por una pelota?

PREDICCIONES Y RESULTADOS

¿Qué resultados arrojan estos experimentos y cuáles son las predicciones que suelen ofrecer los estudiantes?

En el experimento 1 (en el que la pantalla se ilumina con una fuente de luz en forma de cruz y no hay obstáculo intermedio), muchos alumnos predicen una región iluminada en forma de cruz cuando en realidad lo que se observa es toda la pantalla iluminada en forma homogénea.

En el experimento 2 (en el que hay un obstáculo con una apertura relativamente grande en forma de círculo), se observa que la región iluminada tiene la misma forma que la apertura (un “redondel”), y nuestra experiencia muestra que casi todos los alumnos predicen este resultado correctamente. Es decir que en este caso los modelos personales de los estudiantes

predicen con éxito los resultados observados. Aclaremos de todos modos que esto no quiere decir que los modelos sean “correctos” porque, como veremos en seguida, pueden fallar a la hora de explicar o predecir otros resultados.

Lo mismo ocurre con el experimento 5, en el que se coloca un obstáculo grande con respecto a la fuente de luz y se trata de predecir la forma de la sombra. Los estudiantes predicen correctamente, en su mayoría, que la sombra será redonda.

En el experimento 3 los alumnos deben predecir la forma de la imagen que se produce con una apertura circular muy pequeña. Casi todos predicen una imagen circular cuando en realidad lo que se observa es una cruz. Este resultado es sin duda sorprendente para todo aquel que no tenga experiencia previa con aperturas “cabeza de alfiler”. Más aún, en el experimento 4, cuando colgamos frente a la pantalla un obstáculo pequeño, la sombra también tiene forma de cruz. Este resultado es francamente inusitado aun para quienes tienen algo de experiencia en óptica.

EXPLICACIONES Y MODELOS

Un estudio cuidadoso de los dibujos, las predicciones y las explicaciones ofrecidas por los estudiantes permite distinguir dos tipos de ideas organizadas que usan en forma consistente para analizar una variedad de situaciones. Por lo tanto, se puede hablar de dos modelos teóricos[2] que los alumnos usan al razonar sobre la producción de sombras e imágenes.

Un tipo de explicación es el “modelo de cabida o encaje”. Las predicciones hechas con este modelo se explican según la cruz quepa o no en la apertura o el obstáculo. La idea subyacente es que la imagen de la fuente se propaga –o viaja por el espacio– como una entidad. En los dibujos, aparecen rayos paralelos emanando de la fuente, y cruces viajando como si esos rayos paralelos fueran rieles que llevan la imagen entera hacia la pantalla.

La figura 14.1 muestra el dibujo esquemático que corresponde a este modelo de cabida o encaje en el caso de aperturas. Las aperturas, indicadas por redondeles, son agujeros hechos en una cartulina (la cartulina no aparece en el esquema para poder resaltar el paralelo entre agujeros y obstáculos, o sea, entre imágenes y sombras). El argumento que apo-

2. Véase el capítulo 7 para una discusión detallada del concepto de “modelo teórico”.

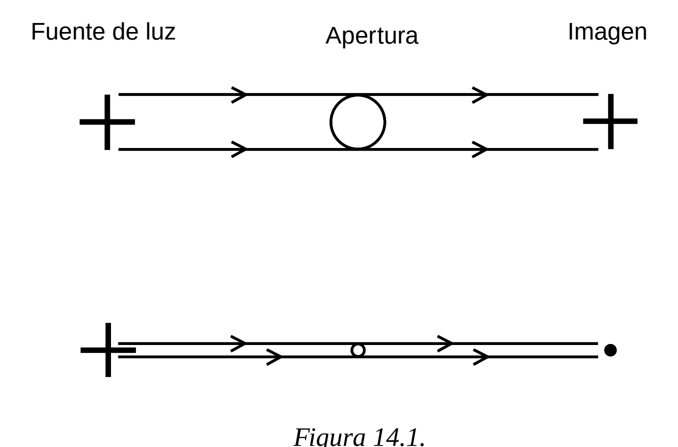


Figura 14.1.

ya la predicción en este caso es el siguiente: si la cruz encaja –o cabe– en el agujero grande, se verá su imagen en la pantalla; si la cruz entera no pasa por el agujero chico, se verá solamente un redondel en la pantalla, que es la porción de luz (la encrucijada) que sí cabe en el agujero de la cartulina.

Las predicciones con este modelo son exactamente opuestas a lo que sucede en realidad.

Cuando en vez de aperturas hay obstáculos redondos suspendidos entre la fuente de luz y la pantalla, las predicciones con el modelo de cabida o encaje suelen ser así: si la bola es del tamaño de la cruz luminosa, o más grande, entonces la bloquea en su totalidad y en la pantalla se verá una sombra en forma de redondel; en el caso de la bolita pequeña, sólo se impide el paso de la pequeñísima parte central de la cruz, y en la pantalla se verá una cruz luminosa con una pequeña sombra redonda en la encrucijada.

Otro modelo, específico para las sombras, supone que, cuando la luz le pega al objeto opaco, éste "larga" su sombra, la echa o la proyecta hacia la pantalla. El rol de la luz es el de disparador o gatillo de la acción del objeto que proyecta su propia sombra. Los elementos de este "modelo gatillo" son la sombra que le pertenece al objeto y la luz que sirve de gatillo para que el objeto lance su sombra. Aquí la sombra aparece como un ente en sí, como la presencia de algo y no como la ausencia de luz. Las predicciones hechas con este modelo son siempre sombras redondas, con la forma del objeto que actúa como obstáculo entre la luz y la pantalla.

FENÓMENOS DISCREPANTES

Una vez concluidas las predicciones, el docente demuestra lo que sucede en las cinco situaciones experimentales. La consigna para cada alumno es: “Anotá lo que ves. Compará lo que ves con tu predicción. Si no coinciden, hacé un diagrama y explicá cómo se forma lo que ves en la pantalla”.

Como ya adelantamos, cuando se usan aperturas redondas o bolas grandes, las imágenes y las sombras producidas son circulares. Éstas son situaciones relativamente comunes en la vida diaria, ya que las aperturas y los objetos generalmente son grandes con respecto a la fuente, o están muy cerca de la pantalla (por ejemplo, nuestra sombra en el suelo en un día de sol). Aun así, para los alumnos que usan lo que hemos llamado el modelo “de cabida” la imagen circular resulta sorprendente.

También vimos con anterioridad que cuando el agujero o el obstáculo que se interponen son pequeños –en comparación con el tamaño de la fuente de luz– se produce en la pantalla una imagen o una sombra que tiene la forma de la fuente de luz: una cruz. Estos resultados también son sorprendentes para la mayoría de los alumnos y ponen de manifiesto claramente que sus ideas para analizar el problema eran inadecuadas.

Cuando el alumno trata de explicar lo que realmente se ve en la pantalla al encenderse la luz, a veces aparece un tercer modelo, que es una variación del modelo de cabida. En el intento de salvar la idea de una imagen que viaja entera hacia la apertura, hay quienes postulan que la imagen se encoge para caber en el agujero pequeño, y luego se agranda del otro lado, formando una cruz en la pantalla,[3] como muestra la figura 14.2.

El agujero pequeño aparece así dotado de características especiales, tal como un espejo que refleja y una lente que magnifica. El problema, claro, es que la predicción con el agujero grande sigue siendo errónea.

3. Esto puede dar lugar a una secuela interesante de actividades-predicciones-explicaciones si se modifica la fuente de luz de modo que su forma sea asimétrica (es muy simple convertir a la cruz en una T). Con esta fuente asimétrica se puede mostrar al alumno que la imagen y la sombra sí tienen la forma de la fuente de luz, es cierto, pero *invertida* (patas para arriba). Esto da por tierra con el modelo de cabida, y el alumno debe seguir buscando explicaciones, o el docente sugerirlas.

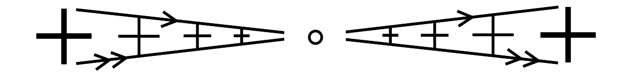


Figura 14.2.

EXPLICACIÓN CIENTÍFICA DE LOS EFECTOS OBSERVADOS

La situación está madura para la intervención del docente. Muy cuidadosamente, explicando su proceder a cada paso, el docente describe el caso en que la imagen y la sombra toman la forma de la fuente de luz. Estamos en pleno ámbito de la óptica geométrica.[4]

El principio que rige en la formación de la imagen es el que hace posible la cámara fotográfica "cabeza de alfiler": con una apertura muy pequeña hay una correspondencia punto a punto entre la fuente de luz y la imagen, como se ve en el diagrama de rayos luminosos de la figura 14.3 (en este diagrama, para mayor claridad, la fuente de luz es simplemente un elemento vertical luminoso).

Una vez que los alumnos entienden cómo se forma la imagen, la sombra se puede pensar como una "anti-imagen": aparece donde la imagen queda obstruida. O sea que cada punto de la sombra, al igual que sucedía con la imagen, corresponde a un punto de la fuente de luz.

Por el contrario, en el caso en que la apertura y la oclusión son grandes con respecto al tamaño de la fuente de luz, hay muchos rayos de cada punto de la fuente que forman lo que vemos en la pantalla; en estos casos, la correspondencia entre la fuente y lo que se ve en la pantalla ya no es de uno a uno, sino que a cada punto de la fuente corresponden muchos puntos en la

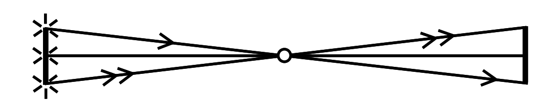


Figura 14.3.

4. Los alumnos que saben algo de óptica física suelen tratar de explicar las cruces en la pantalla como fenómenos de difracción.

pantalla. Una forma interesante de conceptualizar lo que sucede es imaginar que la ventana grande es equivalente a una infinidad de agujeros de alfiler contiguos y, por lo tanto, la imagen en la pantalla está constituida por infinidad de cruces luminosas superpuestas que dan como resultado lo que vemos: luz homogénea.

Como hemos visto, las actividades de este capítulo se prestan para afrontar ideas contraintuitivas en la temática que nos ocupa. Para otros temas será necesario encontrar actividades adecuadas consultando la literatura pertinente o, simplemente, escuchando con mucha atención y respeto lo que nos dicen los alumnos. Por lo demás, las técnicas de enseñanza son siempre las mismas: explicitar las ideas de los alumnos, demostrar instancias que discrepan con esas ideas y, finalmente, ayudar a construir nuevas ideas que se correspondan con las observaciones.

15

FUERZAS: EL RESBALADIZO CAMINO ENTRE LAS PRECONCEPCIONES Y EL CONCEPTO CIENTÍFICO

La primera ley de Newton, o ley de la inercia, es una de las piedras angulares de la física. Aunque se estudia en todos los currículos escolares de ciencia y es fácil de enunciar, es una idea que ofrece, sin embargo, muchos problemas conceptuales a los estudiantes.

La ley, que fue primero establecida con claridad por Galileo y luego refinada por Newton, dice así: "Para cambiar la velocidad de un objeto es necesario aplicar una fuerza sobre el mismo". En particular, si un objeto no está en movimiento, esta ley establece que, sin la acción de una fuerza, no se moverá, porque su velocidad no dejará de ser nula. Y si un objeto se encuentra en movimiento, y si ninguna fuerza actúa sobre él, entonces continuará moviéndose a velocidad constante y en línea recta. Con distinta fraseología esta ley aparece en todos los libros de física. Así planteada, la ley parece describir qué pasa con un objeto cuando es afectado por una fuerza y presupone que todos entendemos qué es una fuerza.

A pesar de que los estudiantes pueden repetir estos enunciados, la experiencia muestra que es sumamente difícil que internalicen el significado físico de esta ley y puedan usarla para resolver problemas o predecir correctamente el comportamiento de distintos sistemas. Una de las razones por las cuales esta ley tan fundamental les resulta difícil es, sin duda, la existencia de una confusión generalizada sobre el concepto de fuerza.

El término “fuerza” frecuentemente se define como “aquello que hacemos cuando tiramos de un objeto o lo empujamos”. Esta definición apela a nuestra sensación física de fuerza, lo cual acarrea ciertos problemas. Por ejemplo, la expresión corriente “tengo fuerza” hace pensar que la fuerza es algo que se puede tener o incluso perder o transferir, una idea muy común en situaciones cotidianas, pero ciertamente problemática para la física.

En realidad, la ley de inercia puede ser interpretada como una definición cualitativa del concepto de fuerza, es decir, “fuerza es aquello que cambia el movimiento de un objeto”. En otras palabras, para entender a fondo qué es una fuerza deberemos primero comprender la ley de inercia, lo cual parece un problema del tipo “el huevo o la gallina”: ¿podemos enseñar una cosa sin aprender primero la otra?

Creemos que existen formas de presentar estos temas de modo de evitar algunas de las confusiones. Pero veamos primero con mayor detalle cómo pueden ser detectadas ciertas preconcepciones de los estudiantes sobre las fuerzas y cómo trazar un camino que evite las confusiones esbozadas.

LAS DIFICULTADES DE LOS ESTUDIANTES

Imaginemos una clase introductoria de física, en la que queremos explorar la idea de inercia por primera vez. Decidimos hacerlo lentamente y con diálogos socráticos que ayuden a los estudiantes a construir sus ideas sobre la base de observaciones y sus consecuencias lógicas. Queremos también hacer referencia a los desarrollos históricos de manera que revemos las ideas aristotélicas del movimiento. Después de ello, dice el docente:

> *Docente*: Según Aristóteles, cuando aplicamos una fuerza, un objeto se mueve pero, cuando dejamos de aplicar la fuerza, el objeto deja de moverse. ¿Les parece que esta explicación de Aristóteles se aplica a todos los objetos en movimiento? ¿Los convence? ¿Qué pasa cuando tiro esta lapicera por el aire? Yo ya no la empujo y sin embargo se sigue moviendo.
>
> *Estudiante*: No, lo que pasa es que la fuerza sigue en la lapicera.
>
> *Docente*: ¿Qué quiere decir que la fuerza “sigue en la lapicera”?

Estudiante: Y… que algo le pasa que se sigue moviendo.

Docente: Ya sabemos que se sigue moviendo porque lo vemos, pero no estoy tan seguro de que la fuerza todavía actúa sobre la lapicera. ¿Cómo puede actuar si no la estoy tocando?

Estudiante: Porque le quedó adentro.

Docente: ¿Por qué entonces la lapicera al final deja de moverse?

Estudiante: Porque choca contra el suelo.

Docente: Bueno, pero si hago rodar una bolita en el piso, no choca contra el suelo pero también se detiene.

Estudiante: Porque se le acaba la fuerza que tenía.

Estudiante 2: No, es por la fricción.

Docente: ¿Y qué es la fricción?

Estudiante 2: Es el rozamiento.

Este diálogo muestra que los estudiantes no expuestos a ciencias tienen ideas confusas acerca de qué es y qué no es una fuerza. Y estas ideas son obstáculos para una discusión del posible efecto de las fuerzas, por más socrático e informado que sea el diálogo entablado por el docente. De hecho, la idea de que un objeto en movimiento conserva la fuerza en su interior (y que eventualmente puede perderla o transferirla a otro objeto) es muy cercana a la noción de "ímpetus" de la Edad Media.[1] Decirles a los estudiantes que una fuerza es "lo que hacemos al empujar o al tirar de algo" generalmente *no* ayuda a aclarar las cosas. Como veremos a continuación, el problema de los estudiantes es que no han adquirido el concepto de interacción.

Una de las grandes contribuciones del físico Robert Karplus (Karplus y Thier, 1967) a la enseñanza de la ciencia consistió en identificar los ti-

1. Para un análisis de la evolución histórica y cognitiva de la idea de ímpetus y fuerza véase Piaget y García (1982). Para un estudio técnico y detallado de la evolución histórica del concepto de fuerza véase *Concepts of Force* de Jammer (1957).

pos de conceptos que se manejan en el pensamiento científico para así poder explorarlos en profundidad y deliberadamente desde edades tempranas. Karplus señala que, en primer lugar, la ciencia se ocupa de *objetos materiales* como las nubes, las estrellas o una piedra. Los objetos tienen *atributos* o *propiedades*, y éste es un segundo tipo de concepto que se maneja en ciencias (como así también en la vida cotidiana). Así, el color verde no es un objeto material, sino un atributo de ciertos objetos materiales. Los estudiantes, por supuesto, conocen infinidad de propiedades y pueden reconocerlas como tales: color, sabor, densidad, volumen, inflamabilidad, localización. Finalmente, los objetos pueden *interactuar* unos con otros y con nosotros. El concepto de interacción y la identificación de interacciones pueden resultar más difíciles. En una interacción, dos o más objetos actúan unos sobre otros. Ejemplos de interacciones son: una reacción química (donde dos o más sustancias cambian de propiedades), un circuito eléctrico formado por una lamparita y una pila (la lamparita se prende y simultáneamente la pila se va gastando), iluminar algo (o verlo), calentar o enfriar cosas.

Uno de los problemas con la enseñanza del concepto de fuerza es que muchos estudiantes tienden a pensar las fuerzas como propiedades o atributos de los objetos en movimiento (y en parte las confunden con la velocidad o el momento de inercia) y no como lo que son: interacciones entre objetos que cambian sus movimientos.

EL CONCEPTO DE FUERZA ABORDADO A TRAVÉS DE LA IDEA DE INTERACCIÓN

Una posible forma de introducir la idea de fuerza en el aula es comenzar con experimentos simples con objetos en movimiento, sin mencionar la palabra “fuerza”.

Imaginemos una demostración en la que, por un riel metálico horizontal de unos dos metros de largo, se desplazan dos autitos casi sin rozamiento. Los dos autitos tienen la misma masa. Dejamos uno de los dos en reposo, empujamos el otro y los dejamos chocar. El auto en movimiento quedará en reposo y el que estaba en reposo comenzará a moverse aproximadamente a la misma velocidad que tenía el primero.

A partir de observaciones tan simples como ésta, podemos extraer un cúmulo de conclusiones. Podemos preguntar:

- ¿A qué velocidad iba el primer autito?
- ¿Esa velocidad era constante, aumentaba o disminuía?
- ¿Qué pasó cuando los autitos chocaron?
- ¿El segundo auto terminó yendo a velocidad constante, acelerando o desacelerando?

Y con mayor profundidad:

- ¿Qué pensás que tiene que pasarle a un objeto para que cambie su velocidad?

A partir de los experimentos realizados la respuesta es que los autitos cambian la velocidad cuando se tocan o chocan, es decir, cuando interactúan. Los autitos pueden estar dotados de imanes que se repelan, y de esta manera puede observarse que no hace falta que los objetos se toquen para cambiar de velocidad pero deben de alguna forma interactuar unos con otros. Mientras que un objeto pierde velocidad, el otro la gana.

En una segunda etapa se puede pedir a los alumnos que imaginen un autito sobre el riel que, a medida que avanza, va chocando con numerosos papeles de seda puestos a su paso (no sobre el riel sino colgados de un hilo que corre por encima del riel). Cada vez que el autito choca con un papel pierde algo de velocidad y el papel se ve empujado hacia adelante. ¿Qué pasa con la velocidad del autito en este caso? ¿Qué pasaría si pusiéramos infinidad de papelitos uno atrás del otro? La respuesta es que el autito iría disminuyendo de velocidad paulatinamente. Esto es exactamente lo que pasa cuando dejamos un objeto moviéndose en una superficie por largo rato. La fricción actúa como muchísimos choques infinitamente pequeños. Es decir que, cuando un autito se frena, está interactuando con la superficie en la que se mueve. ¿Qué pasaría si elimináramos esta interacción? En otras palabras, ¿cómo es el movimiento de un objeto en ausencia total de interacciones con otros objetos?

UN EXPERIMENTO MENTAL

Galileo atacó el problema del movimiento imaginándose una situación sin rozamiento. Esto podemos hacerlo fácilmente a partir de casos conocidos. Imaginemos que una bolita rueda por una superficie muy áspera, como

el papel de lija. Ahora la hacemos rodar en un piso de madera pulido. ¿Rodará más o menos lejos? ¿Qué sucederá a medida que pulamos más y más la superficie? ¿Qué pasaría si la superficie estuviera infinitamente pulida?

Es posible que los estudiantes se resistan a la idea de algo infinitamente pulido, porque, aducirán, siempre existirá algo de fricción. El docente admitirá que esto es cierto, pero también resaltará la maravillosa utilidad de imaginarnos algo extremo, aunque no se pueda alcanzar.

Se llega así, entonces, a la idea de que el autito del ejemplo anterior, y la bolita de este ejemplo, si no interactúan con otro objeto –chocando con otro autito o por fricción con el suelo–, no se mueven o bien se mueven a velocidad constante. Para cambiar este estado de cosas es necesario que los objetos interactúen entre sí, aunque no todos los tipos de interacciones redundarán en un cambio de velocidad. Por ejemplo, si iluminamos un objeto o lo insultamos, no cambiará su velocidad.

Una vez llegado a este punto tenemos en nuestras manos la idea de fuerza sin haberla nombrado. En este momento bastará con decir: “A aquellas interacciones que provocan un cambio de velocidad las llamaremos ‘fuerzas’ ”.

Vale destacar que en ningún momento ha sido necesario introducir el término “inercia”, aunque hemos usado la idea de inercia sin nombrarla para arribar al concepto de fuerza (en vez de proceder de manera inversa).

Ahora pasamos a identificar fuerzas en situaciones más complicadas. Cuando una piedra se precipita hacia el suelo acelerándose, ¿cuáles son los objetos que están interactuando? En este caso son la piedra y el planeta Tierra. La idea de que las fuerzas no existen solas, en el aire, sino que son maneras en que los objetos interactúan está pavimentando el camino para la tercera ley de Newton (que dice que todas las fuerzas vienen en pares). Es un buen ejercicio, cada vez que identificamos un objeto cuya velocidad cambia, pedir a los estudiantes que identifiquen explícitamente cuál es el otro objeto que está operando sobre, o interactuando con, el primero. Por ejemplo: “La piedra cae hacia el suelo; su velocidad está aumentando. Sobre ella actúa una fuerza (de atracción) ejercida por el planeta Tierra”, o “El auto está frenando; sobre las ruedas actúa una fuerza ejercida por las pastillas de freno”.

El siguiente paso consistirá en proveer una idea más acabada de los efectos de las fuerzas sobre objetos en movimiento. Este camino es largo y requiere de varios conocimientos previos, fundamentalmente de la

idea de aceleración. Ofrecemos aquí algunas formas de arribar a estas ideas subrayando la noción de fuerza como interacción y prosiguiendo con el acercamiento al carácter contraintuitivo de la primera ley de Newton.

DE COLISIÓN A EMPUJE

Para lograr una idea más refinada de fuerza es importante observar que si aplicamos una fuerza constante sobre un objeto, éste sufrirá una aceleración constante. Para elaborar esa idea es conveniente un manejo más o menos acabado de las nociones básicas de la cinemática del movimiento acelerado y su representación en gráficos cartesianos.

De todas maneras, podemos hacer uso de una modificación del experimento mental incorporando los infinitos papeles de seda que mencionamos más arriba. Recordemos que en aquel caso razonamos que el rozamiento de un objeto con una superficie podía ser pensado como equivalente a infinitas colisiones de minúsculo efecto. Ahora vamos a pensar a la fuerza que empuja como si se tratara de infinitas colisiones.

Imaginemos un objeto en reposo. Le damos un golpe instantáneo y comienza a moverse. Supongamos, como en el experimento mental de Galileo, que la superficie es perfectamente lisa y pulida y que por lo tanto el objeto en movimiento no interactúa con esa superficie sino sólo con nuestro dedo cuando le damos el golpe. Este golpe es equivalente a un autito imaginario que golpea el objeto de atrás y lo empuja un poco. Ahora el objeto estará moviéndose a velocidad constante, porque no interactúa con nada (ni con la superficie, porque está perfectamente pulida, ni con nuestro dedo porque ya no estamos tocando al autito). En seguida le damos un segundo golpe. ¿Qué sucede ahora con la velocidad del objeto? Ha aumentado debido al golpe. ¿Es constante o no? Es constante porque, otra vez, no está interactuando con nada. Si lo seguimos golpeando, en cada instante que lo golpeamos el objeto dará un salto en su velocidad, la cual aumentará un poco.

Ahora imaginemos que nuestros golpecitos se suceden más frecuentemente. También los saltos en velocidad serán más frecuentes. Si representáramos este movimiento en un gráfico de velocidad *versus* tiempo, la curva parecería una escalera ascendente. Cuanto más frecuentes sean los golpecitos, menos anchos serán los escalones. Si hiciéramos nuestras colisiones

infinitamente frecuentes,[2] estaríamos virtualmente empujando el objeto de manera constante. El gráfico ahora luciría como una línea recta subiendo en forma diagonal, pero sin escalones visibles. Esto quiere decir que podemos visualizar a una fuerza actuando sobre un objeto como una sucesión infinita de minúsculas colisiones.

Este experimento mental nos está diciendo que cuando apliquemos una fuerza sobre un objeto éste aumentará su velocidad de manera constante. No adquirirá una velocidad determinada sino que su velocidad aumentará mientras mantengamos aplicada la fuerza. Si la fuerza desaparece, el objeto se moverá, como nos indicó nuestro experimento mental anterior, a velocidad constante.

Ahora bien, todos estos experimentos mentales son muy bonitos pero pueden dejarnos con la impresión de que fuimos acorralados por una triquiñuela lógica y forzados a admitir algo que en el fondo no es cierto (tal como nuestra intuición pareciera querer advertirnos). ¿Existe alguna manera de ejecutar estos experimentos mentales? Los efectos reales de las fuerzas seguirán permaneciendo oscuros a menos que podamos poner a los estudiantes en contacto directo con una situación sin rozamiento o con rozamiento prácticamente nulo.

UN FENÓMENO DISCREPANTE

Podemos concretar el experimento mental de Galileo de varias maneras.

Nuestra opción favorita es usar un pedazo grande (de unos veinte por veinte centímetros) de hielo seco que se mueva sobre un vidrio templado (otras superficies muy lisas, como muchas mesadas de laboratorio y mesas de fórmica también dan muy buenos resultados). Debe notarse que no se trata aquí de realizar un experimento preciso con mediciones (aunque la experiencia puede repetirse con intenciones cuantitativas), protocolos o informes de laboratorio. Se trata más bien de darles la oportunidad a los estudiantes de jugar y "sentir" un movimiento en el cual la fricción es mínima. Invariablemente se muestran sorprendidos y encantados, y el simple hecho de darle un empujoncito suave a un pedazo de hielo seco los ayuda sobremanera a comprender la primera ley de Newton.

2. Nótese que éste es, conceptualmente, el camino hacia el análisis diferencial. Este abordaje tiene el beneficio adicional de introducir a los estudiantes tempranamente a fecundas ideas matemáticas en forma cualitativa.

Sobre el bloque de hielo seco pueden colocarse objetos muy pesados (por ejemplo guías de teléfono; nosotros hemos usado un botellón de agua de 20 litros) y el bloque sigue moviéndose con la misma facilidad espectral, para el deleite de cualquier observador. Esta experiencia exploratoria puede hacerse más rica con una serie de preguntas:[3]

1. ¿Cómo se comporta el bloque de hielo seco una vez que se está moviendo? ¿Cuál es la diferencia entre esta situación y aquella en la que objetos comunes se deslizan en superficies comunes?
2. ¿Qué pasa con el movimiento del bloque si le das un empujoncito suave en la misma dirección en la que se está moviendo? ¿Qué pasa si le das otro empujoncito? ¿Cómo describirías el movimiento del bloque entre empujón y empujón?
3. ¿Qué pasa si el empujoncito es en la dirección opuesta al movimiento del bloque? ¿Qué pasa si le das muchos golpecitos similares? ¿Cómo describirías el movimiento del bloque entre empujón y empujón?
4. Dejá el bloque en un punto en reposo. ¿Cuál es la fuerza más pequeña que se le puede aplicar al bloque y que le produzca un cambio de velocidad? O sea: ¿hay una fuerza mínima por debajo de la cual el bloque no se moverá?[4]
5. Suponé que el bloque se está moviendo y que vos ejercés una fuerza constante, sea para apresurar o enlentecer el movimiento del bloque. ¿Qué pasa entonces con el bloque? ¿Qué pasa si hacemos nuestra fuerza más y más leve? ¿Cómo se comportará el bloque cuando nuestra fuerza se vaya aproximando a cero?
6. Suponé que ejercés dos fuerzas sobre el bloque en direcciones opuestas al mismo tiempo, una con cada mano. ¿Qué pasará con el bloque cuando una fuerza es más intensa que la otra? ¿Y si las dos fuerzas tienen la misma magnitud?
7. Si el bloque ya está en movimiento, ¿qué tipo de acción de nuestra parte puede hacer que su movimiento cambie de dirección?
8. En todos los casos anteriores, identificá con qué otro objeto interactuó el bloque de hielo seco para cambiar su velocidad.

3. Modificadas de Arons (1997b).

4. La respuesta, de enorme importancia, es que no existe un mínimo. Cualquier fuerza neta, por más minúscula que sea, producirá una aceleración. Cuanto más pequeña sea la fuerza, menor será la aceleración, convergiendo las dos en cero.

Acabamos de usar un fenómeno discrepante para poder alcanzar comprensiones más profundas. Jugar con el hielo seco y meditar sobre estas preguntas acercarán más a los estudiantes a la idea de que las fuerzas son interacciones entre objetos que redundan en cambios de velocidad (aceleraciones) y que en ausencia de esas interacciones, por definición, los objetos mantienen la velocidad que tenían. Éste es el corazón de las dos primeras leyes de Newton. Para dar una idea completa de la segunda ley, deberíamos introducir cuidadosamente la idea de masa inercial y su efecto en el movimiento. Pero no vamos a detenernos en este tema en el presente libro.

VOLVER SOBRE EL TEMA

Los experimentos mentales descriptos y la familiarización con un fenómeno discrepante pueden ahora usarse como puntos de referencia cuando los problemas con las mismas ideas vuelvan a surgir (porque volverán a surgir).

Imaginemos que, una vez estudiadas las leyes de Newton en mayor detalle, se les presenta en el pizarrón a los alumnos el siguiente problema:

> Una persona arrastra una caja en un piso rugoso a velocidad constante de 5 m/s por medio de una balanza de resorte (un dinamómetro). El resorte lee 500 N. ¿Qué magnitud y dirección tiene la fuerza de fricción?

Normalmente los estudiantes se muestran confundidos ante un problema como éste. “¿Qué hago con la velocidad? ¿Cómo es posible calcular la fricción?”. Veamos en un diálogo cómo las referencias a lo estudiado hasta ahora pueden ayudar.

Estudiante: ¿Cómo es posible saberlo? No, esperen, ya sé: la fricción tiene que ser menor que la fuerza que uno usa para tirar del objeto.

Docente: ¿Menor? ¿Por qué?

Estudiante: Porque si no, no se movería.

Docente: Lo que estás diciendo es que un objeto no se puede mover sin una fuerza que lo mueva. A ver, volvamos a la situación del hielo seco. ¿Se acuerdan? Imaginen un pedazo de hielo seco sobre la mesa, sin moverse. ¿Cuál es la fuerza neta[5] que actúa sobre el hielo seco?

Estudiante: Es cero; el hielo seco no se mueve. Su peso es compensado por la mesa que lo empuja para arriba.[6]

Docente: Perfecto. Ahora imaginemos que lo empujo un poquitín. Mientras lo empujo, la fuerza neta no es cero, ¿verdad? Y ahora lo dejo de empujar. ¿Qué pasa con el hielo seco?

Estudiante: Se sigue moviendo.

Docente: ¿Se acelera?

Estudiante: Si no lo empujás, no.

Docente: ¿Va yendo cada vez más despacio?

Estudiante: No... en realidad, no. Se para cuando choca con algo, y a veces va más despacio cuando la mesada está sucia.

Docente: Sí, pero cuando está limpia...

Estudiante: Va a velocidad constante.

Docente: ¿Y cuál es la fuerza neta que actúa sobre el hielo seco en ese momento?

Estudiante: ¿…La fricción?

Docente: Dijimos que casi no hay fricción.

5. Asumimos aquí que los estudiantes han avanzado en su estudio de dinámica y saben qué es la combinación vectorial de fuerzas y la fuerza neta.

6. También asumimos que han estudiado la fuerza normal.

Estudiante: Es verdad, no hay fricción... así que... la fuerza neta tiene que ser cero.

Docente: *Es* cero. Supongamos que lo empujo despacito en la misma dirección en la que se mueve; entonces va a acelerar. Y si lo empujo en la dirección opuesta a su movimiento se va a desacelerar. O sea que si lo empujo, si aplico una fuerza, por más pequeña que sea, el hielo seco se va acelerar o se va a ir desacelerando. ¿No es cierto?

Estudiante: Sí.

Docente: Pero si yo estoy tirando del objeto y el objeto todavía se mueve con velocidad constante quiere decir que tiene que haber una fuerza exactamente igual pero contraria que haga que la fuerza neta sea cero. ¿Y cuál es esa fuerza?

Estudiante: Tiene que ser la fricción.

Docente: Entonces, ¿qué valor tiene que tener la fricción?

Estudiante: Tiene que ser de 500 N y en la dirección contraria. Yo entiendo. Lo que no puedo creer es que un objeto pueda moverse con fuerza neta cero.

Docente: ¡Aleluya! ¡Claro que es difícil de creer! La mayor parte de la humanidad no lo creyó por miles y miles de años. Los pensadores más geniales no se dieron cuenta. Tuvo que venir un Galileo para poder verlo. No es nada fácil. Y de eso hablábamos el otro día: de cómo la ciencia nos muestra cosas que parecen totalmente locas y contraintuitivas. No hay que sentirse mal porque cueste entenderlo, las mentes más grandes tienen las mismas dificultades.

En este diálogo vemos cómo podemos usar la experiencia del bloque de hielo seco para volver a ella y evocar en los estudiantes las sensaciones que buscamos, y que puedan a través de esta evocación encontrar la respuesta correcta al problema que enfrentan. Ésta es una estrategia posible con ideas contraintuitivas: encontrar una experiencia o fenómenos que hagan cortocircuito con las ideas previas o que ilustren o den apoyo a las ideas que queremos desarrollar; después, este fenómeno puede ser un punto de referencia común para poder pensar otras situaciones.

Las ideas contraintuitivas no dejarán de serlo por más que las abordemos directamente y sin ambigüedades; volverán a salir a la superficie una y otra vez como cuestiones no resueltas. El docente tiene que estar preparado para explicar estos temas una y otra vez y para ayudar a sus alumnos a visualizar la situación numerosas veces. Si se puede, es aconsejable diseñar el currículo de tal manera que las ideas contraintuitivas aparezcan en nuevas representaciones, es decir, con otros aspectos, en otros contextos. Al estudiar electrostática, por ejemplo, puede aparecer la idea de fuerza eléctrica y ésta es una buena excusa para analizar nuevamente problemas que involucren las leyes de Newton y la idea de fuerza. Las concepciones erróneas, basadas en el sentido común, volverán a asolar la clase y no se darán por vencidas. Tampoco debe rendirse el docente.

Apéndice

Prácticas pedagógicas sugeridas

Reunimos en este Apéndice las prácticas pedagógicas que hemos ido sugiriendo a lo largo del libro para destacar los cinco aspectos de la ciencia que consideramos esenciales en la enseñanza.

Evidentemente, en el aula se tratan temas o tópicos científicos y no aspectos de la ciencia descontextualizados. Por lo tanto, los fenómenos, métodos y teorías aparecerán entrelazados y mezclados con conceptos contraintuitivos y cuestiones sociales. O sea que las prácticas pedagógicas deberán formar un andamiaje que sustenta cualquier clase o lección. Y el docente ha de incorporar las prácticas a su repertorio de estrategias como un todo, sin referencia a la forma en que fueron introducidas en los capítulos expositivos de este texto.

Pensamos, entonces, que será útil la recapitulación sin encasillamientos que aquí ofrecemos pues, a semejanza de los listados ornitológicos que llevan consigo los entusiastas para marcar los pájaros que han logrado avistar, este apéndice le servirá al docente para marcar las técnicas a medida que las vaya usando en sus clases.

Tendrá así un índice que le indicará cuánto va incorporando en el aula de lo que la ciencia nos dice sobre cómo enseñarla.

Así pues, la ciencia nos dice que para enseñarla debemos:

- Brindar la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre ellos.

- Usar la secuencia “fenómeno-idea-terminología” al explorar un tema.

- Utilizar preferentemente definiciones operacionales en lugar de definiciones de corte teórico.

- Modificar o refinar conceptos y definiciones de términos sobre la base de nuevas observaciones o ideas.

- Desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio.

- Usar actividades de exploración guiadas que arranquen “de cero”, es decir, fomentando que los estudiantes construyan sus ideas de acuerdo a lo que perciben.

- Prestar atención a la dinámica del aula; por ejemplo, brindando suficiente tiempo a los alumnos para que piensen y elaboren sus respuestas a preguntas del docente.

- Poner especial atención en indagar la evidencia empírica que lleva a formular conceptos cuando se trata de fenómenos no observables en el aula.

- Considerar casos históricos, analizando la secuencia de desarrollo de una idea a partir de las observaciones y los experimentos, incluyendo la definición de términos.

- Analizar casos históricos de desarrollo de preguntas, hipótesis, experimentos y análisis de resultados.

- Desarrollar en los estudiantes el arte de formular preguntas deliberadamente.

- Desarrollar en los estudiantes el hábito de preguntar “cómo” antes de “por qué”.

- Desarrollar el hábito de preguntarse “¿Qué pasaría si…?” (es decir, qué pasaría si cambio variables en el fenómeno observado). A falta de predicciones basadas en explicaciones causales se pueden admitir “conjeturas educadas” pero no admitir adivinanzas descabelladas.

- Desarrollar en los estudiantes el hábito de formular hipótesis frente a cualquier pregunta.

- Desarrollar en los estudiantes la costumbre de hacer predicciones basadas en la hipótesis formulada.

- Fomentar en los estudiantes la capacidad de observación y descripción de lo que observan.

- Enseñar a distinguir entre observación, inferencia e interpretación.

- Estimular el diseño de experimentos que puedan contestar las preguntas o contrastar las hipótesis propuestas.

- Involucrar a los alumnos en experimentos en los que tengan que realizar mediciones para interpretar la validez o no de una hipótesis propuesta.

- Estimular en los alumnos la exploración de diversos tipos de metodologías alternativas o complementarias para la resolución de los experimentos.

- Cuando sea posible, resolver problemas en forma cualitativa antes de embarcarse en cálculos matemáticos.

- Ejercitar la formulación de modelos en clase.

- Clarificar la necesidad de introducir ideas inventadas.

- Enfatizar la conexión entre el aspecto creativo y la base empírica de la ciencia.

- Realizar predicciones basadas en los modelos desarrollados y ponerlas a prueba experimentalmente.

- Recalcar mediante ejemplos la forma en que una teoría da sentido a amplios conjuntos de observaciones.

- Fomentar la discusión en pequeños grupos (análisis de experimentos, formulación de hipótesis, etc.).

- Promover las presentaciones orales y escritas de los alumnos a sus pares, con amplia discusión y crítica constructiva.

- Utilizar diálogos socráticos para detectar saltos lógicos en las argumentaciones y facilitar la construcción de argumentos consistentes.

- Buscar consensos en la clase sobre la base de la evidencia disponible.

- Considerar casos históricos en los que una idea científica fue modificada o descartada, haciendo hincapié en la naturaleza de la crítica (empírica, ideológica, filosófica, u otra).

- Analizar con ejemplos concretos la relación entre ciencia y sociedad (en sus aspectos históricos, políticos, éticos y económicos).

- Reconocer explícitamente el carácter contraintuitivo de algunas ideas científicas e ilustrarlo con casos históricos.

- Dar oportunidad a los alumnos para que expliciten y tomen conciencia de las ideas que traen a clase sobre el tema a encarar.

- Buscar fenómenos, situaciones o experimentos discrepantes que pongan de manifiesto la contradicción entre las preconcepciones de los estudiantes y los resultados científicos consensuados.

- Usar la técnica de pedir predicciones y explicación de las predicciones, y luego contrastar la predicción con lo que sucede. Si fuera necesario, lograr que el alumno cambie su explicación incorporando la nueva evidencia.

LECTURAS RECOMENDADAS

Arnold B. Arons inició en la Universidad de Washington, en Seattle (Estados Unidos), un programa de doctorado que combina la física y la educación. Ha sido un pionero en todo lo que respecta a la comprensión profunda de la física. Su libro *Teaching Introductory Physics* (Arons, 1997b) compila los resultados de numerosísimas investigaciones en aulas sobre la comprensión de conceptos fundamentales de la física por parte de estudiantes de todos los niveles. Profundo, claro y esclarecedor, ahonda en temas relacionados con los aspectos empírico, metodológico, social, abstracto y contraintuitivo de la física.

Existen varios libros de texto de física que responden a unos u otros aspectos discutidos en este libro. Gerald Holton, físico e historiador de la ciencia, generalmente incorpora en sus textos dimensiones históricas que iluminan especialmente los aspectos metodológico y social. Su libro *Understanding Physics* (Cassidy, David; Holton, Gerald y Rutherford, James, 2002) es un texto para la escuela secundaria que ilustra cómo se arribó a muchas ideas en la física. Arons también escribió un magnífico libro de texto de ciencias físicas para nivel secundario titulado *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences* (Arons, 1997a), pero que está agotado. Su discípula McDermott, y colaboradores (1996) son autores de un libro de texto de física para niveles altos del secundario que se deriva de sus estudios de las preconcepciones y aborda muy bien

los aspectos empírico y contraintuitivo. El texto de Rogers (1960) es también profundo y comprehensivo.

Muchos otros libros abordan la ciencia desde un punto de vista histórico. Conant (1957) es el editor e ideólogo de *Harvard Case Histories in Experimental Science*, donde se ilustran varios aspectos del quehacer científico a partir de una serie de casos históricos analizados en detalle (los temas incluyen el descubrimiento del oxígeno, la generación espontánea y la idea de gérmenes, el calor, la electricidad estática, las leyes de Boyle, entre otros). Moore (1999) examina la historia de tres áreas clave de la biología (desarrollo, genética y evolución) y da una idea rica de qué tipo de preguntas motorizaron los avances en ellas. Harré (1981) da una versión escueta de experimentos que hicieron historia, con variados abordajes metodológicos. *Una breve historia de casi todo*, de Hill Bryson (2004) ha sido recientemente traducida al español y constituye una interesante fuente de consulta sobre historia de la ciencia. Asimismo, recomendamos los textos clásicos de Bronowski (1973) y James Burke (1995). Otros interesantes libros históricos son las autobiografías o los diarios, como *La doble hélice* de James Watson (2002), *La estatua interior* de François Jacob (2002), *Autobiografía* de Charles Darwin (1995) o su *Charles Darwin's Beagle Diary* (2001; con una fascinante sección que transcurre en las costas del Río de La Plata y la Patagonia).

El aspecto metodológico en la educación primaria es discutido por Furman y Zysman (2001) en un texto en el cual los autores ejemplifican la observación y la formulación de preguntas curiosas, el diseño de experiencias, el trabajo con modelos, el uso de mediciones y el debate de ideas.

Los textos históricos o con sesgo histórico pueden dar una buena idea del aspecto social de la ciencia, pero existen diversos análisis teóricos de esta área. El libro clásico de Kuhn (1962) *La estructura de las revoluciones científicas* analiza la dinámica interna que gobierna y restringe la actividad científica (e introduce su ya famoso término "paradigma"). Ziman (1968) en su *Public Knowledge* básicamente define la ciencia a partir de sus atributos sociales, defendiendo la idea de que el conocimiento científico es aquel al que se puede arribar por consenso universal. Si bien algunos de sus argumentos resultan algo extremos, las ideas son provocativas. Estas ideas son tomadas y desarrolladas por Cromer (1993). La interacción entre ciencia y sociedad está expuesta de manera accesible en los textos de dos importantes biólogos de Harvard. Gould (2003) describe persuasivamente cómo las ideologías imperantes en los Estados Unidos dieron forma al concepto de "cociente intelectual" y a su uso racista y sexista. Lewontin (1991)

revela los trasfondos ideológicos del Proyecto Genoma Humano y los intereses detrás de él. En un libro para pensar y entender nuestra propia ciencia, el argentino Marcelino Cereijido (1997) reflexiona sobre las razones históricas, políticas y religiosas por las que, según su visión, en América latina no tenemos ciencia como tal sino solamente investigación científica. Las investigaciones sociológicas acerca de la actividad científica pueden encontrarse en los textos de Latour y Woolgar (1995) y Kreimer (1999).

La estructura y validación de teorías y leyes es descripta en forma clara y tradicional por Hempel (1973). Toulmin (1962) nos da una visión aguda de un científico sobre la filosofía de la ciencia y discute varios ejemplos de ideas abstractas y su rol en la ciencia (por ejemplo, su esclarecedora discusión sobre el cero absoluto).

Robert Karplus (eminente físico que realizó profundas contribuciones a la enseñanza de la ciencia en el nivel primario), en su *Introductory Physics: A Model Approach* (1969), pone particular énfasis en la construcción de modelos para explicar los fenómenos de la física. Keller (2000) discute el uso de representaciones y modelos en la explicación de fenómenos biológicos.

BIBLIOGRAFÍA

Andersson, B. y Kärrquvist, C. (1983): "How Swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties", *European Journal of Science Education*, vol. 5, págs. 387-402.

Arons, Arnold B. (1997a): *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences*, Nueva York, Oxford University Press.

— (1997b): *Teaching Introductory Physics*, Nueva York, John Wiley and Sons.

Asimov, Isaac (1975): *Breve historia de la química*, Madrid, Alianza.

— (1980): *Breve historia de la biología*, Buenos Aires, Eudeba.

Bateson, Gregory (1990): *Espíritu y naturaleza*, Buenos Aires, Amorrortu.

Bonaparte, Pablo R. (2001): *La mirada del marciano. Ensayos para conocer lo conocido*, Buenos Aires, EUDEBA.

Boorstin, Daniel J. (1986): *Los descubridores*, Barcelona, Crítica.

Bronowski, Jacob (1973): *El ascenso del hombre*, Bogotá, Fondo Educativo Interamericano.

Brumby, Margaret (1979): "Problems learning the concept of natural selection", *Journal of Biological Education*, vol. 13, nº 2, págs. 119-122.

Bryson, Bill (2004): *Una breve historia de casi todo*, Barcelona, RBA Editores.

Burke, James (1995): *Connections*, Boston, Little Brown & Co.

Burnham, R.; Dyer, A.; Garfinkel, R.A.; George, M.; Kanipe, J.; Levy, D.H. (1998): *Observar el cielo II*, Barcelona, Planeta.

Cassidy, David; Holton, Gerald y Rutherford, James (2002): *Understanding Physics*, Nueva York, Springer-Verlag.

Cereijido, Marcelino (1997): *Por qué no tenemos ciencia*, México, Siglo XXI.

Conant, James B. (1947): *On Understanding Science*, New Haven, Yale University Press.

— (1951): *Science and Common Sense*, New Haven, Yale University Press.

— (1957): *Harvard Case Histories in Experimental Science*, Cambridge, Harvard University Press.

Cromer, Alan (1993): *Uncommon Sense: The Heretical Nature of Science*, Nueva York, Oxford University Press.

Darwin, Charles (1995): *Autobiografía*, Madrid, Alianza.

— (2001): *Charles Darwin's Beagle Diary*, Cambridge, Cambridge University Press.

De Boer, George (1991): *A History of Ideas in Science Education*, Nueva York, Teachers College Press.

Dewey, John (1938): *Experience and Education*, Nueva York, Macmillan.

Díaz-Hellín, José Antonio (2001): *El gran cambio en la física: Faraday*, Madrid, Nivola.

Einstein, Albert e Infeld, Leopold (1938): *The Evolution of Physics*, Nueva York, Touchstone.

Estalella, José (1918): *Ciencia recreativa*, Barcelona, Gustavo Gili.

Feher, E. (1999): "Interactive Museums as Tools for Learning: Explorations with light", *International Journal of Science Education*, vol. 12, nº 1, págs. 34-49.

Furio Mas, Carlos J.; Pérez Hernández, Juan y Harris, Harold H. (1987): "Parallels between adolescents conception of gases and the history of chemistry", *Journal of Chemical Education*, vol. 64, nº 7, págs. 616-618.

Furman, M. y Zysman, A. (2001): *Ciencias naturales: Aprender a investigar en la escuela*, Buenos Aires, Novedades Educativas.

Galilei, Galileo (1632): *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo: ptolemaico y copernicano*, Madrid, Alianza, 1995.

— (1638): *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Madrid, Losada, 2004.

Gardner, Howard (1996): *La nueva ciencia de la mente. Historia de la revolución cognitiva*, Barcelona, Paidós.

— (1997): *La mente no escolarizada. Cómo piensan los niños y cómo deberían enseñar las escuelas*, Barcelona, Paidós.
Gingerich, Owen (2005): *The Book Nobody Read*, Londres, Penguin Books.
Goldberg, F. y McDermott, L.C. (1987): "An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror", *American Journal of Physics*, vol. 55, págs. 108-119.
Gould, Stephen J. (1997): *El pulgar del panda*, Barcelona, Crítica.
— (2001): *La grandeza de la vida*, Barcelona, Crítica.
— (2003): *La falsa medida del hombre*, Barcelona, Crítica.
Guesne, E. (1985): "Light", en R. Driver, E. Guesne y A. Tgiberghioen (comps.), *Children's Ideas in Science*, Filadelfia, Open University Press.
Halperin Donghi, Leticia (1967): *Lavoisier,* Buenos Aires, Centro Editor de América Latina.
Harcombe, Elnora (2001): *Science Teaching / Science Learning. Constructivist Learning in Urban Classrooms*, Nueva York, Teachers College Press.
Harré, Rom (1981): *Great Scientific Experiments. Twenty Experiments that Changed our View of the World*, Mineola, Dover Publications.
Hempel, Carl G. (1973): *Filosofía de la ciencia natural*, Madrid, Alianza Editorial.
Holton, G. y Roller, D. (1958): *Foundations of Modern Physical Science*, Addison-Wesley Publishing Co.
Jacob, François (2002): *La estatua interior*, Barcelona, Tusquets.
James, Frank A. J. L. (comp.) (1991): *The Correspondence of Michael Faraday*, Londres, Institution of Electrical Engineers.
Jammer, Max (1957): *Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics*, Nueva York, Dover Publications.
Judson, Horace F. (1996): *The Eight Day of Creation. Makers of the Revolution in Biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
Karplus, Robert (1963): *One Physicist Looks at Science Education*, Berkeley, Science Curriculum Improvement Study.
— (1969): *Introductory Physics: A Model Approach*, Nueva York, W.A. Benjamin.
Karplus, R. y Thier, H.D. (1967): *A New Look at Elementary School Science*, Chicago, Rand McNally.
Keller, Evelyn Fox (2000): *Lenguaje y vida. Metáforas de la biología en el siglo XX*, Madrid, Manantial.

Koshland, D. E. (2002): “The seven pillars of life”, *Science*, vol. 295, págs. 2216-2216.

Kreimer, Pablo (1999): *De probetas, computadoras y ratones*, Buenos Aires, Universidad Nacional de Quilmes.

Kuhn, Thomas S. (1962): *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de Cultura Económica, 1995.

Latour, Bruno y Woolgar, Steve (1995): *Vida en el laboratorio: la construcción de los hechos científicos*, Madrid, Alianza.

Levy, D. (1995): *Observar el cielo*, Barcelona, Planeta.

Lewontin, Richard C. (1991): *Biology as Ideology: The Doctrine of DNA*, Nueva York, Harper Perennial.

Matthews, Michael R. (1994): *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, Nueva York, Routledge.

Maturana, Humberto y Varela, Francisco (1984): *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria.

McCloskey, M. (1983): “Intuitive Physics”, *Scientific American*, vol. 248, págs. 122-130.

McDermott, Lillian (1984): “Research on conceptual understanding in mechanics”, *Physics Today*, vol. 37, nº 7, págs. 2-10.

McDermott, Lillian C.; Shaffer, Peter S.; Rosenquist, Mark L. y el Physics Education Group University of Washington (1996): *Physics by Inquiry: an Introduction to Physics and the Physical Sciences*, Nueva York, John Wiley.

Menzel, D. H. y Pasachoff, J. M. (1990): *Guía de campo de las estrellas y los planetas*, Madrid, Omega.

Monod, Jacques (1993): *El azar y la necesidad*, Barcelona, Tusquets.

Moore, John A. (1999) *Science as a Way of Knowing: The Foundations of Modern Biology*, Cambridge, Harvard University Press.

Piaget, Jean (1934): *La causalidad física en el niño*, Madrid, Espasa-Calpe.

— (1991): *La construcción de lo real en el niño*, Barcelona, Grijalbo.

Piaget, Jean y García, Rolando (1982): *Psicogénesis e historia de la ciencia*, México, Siglo XXI.

Poirier, Jean-Pierre (1993): *Lavoisier: Chemist, Biologist, Economist*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press.

Pojman, Louis P. (2001): *Environmental Ethics. Readings in Theory and Application,* Stamford, Wadsworth (Thomson Learning).

Porlán, Rafael (1999): “Hacia un modelo de enseñanza-aprendizaje de las ciencias por investigación”, en Kaufmann, M. y Fumagalli, L. (comps.), *Enseñar ciencias naturales*, Buenos Aires, Paidós.

Rey, H.A. (1970): *The Stars*, Boston, Houghton Mifflin Co.

Rogers, Eric M. (1960): *Physics for the Inquiring Mind; the Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.

Rosenvasser Feher, Elsa (2004): *Cielito lindo*, Buenos Aires, Siglo XXI.

Rowe, Mary Budd (1978): *Teaching Science as Continuous Inquiry*, Nueva York, McGraw-Hill Inc.

Rutherford, F. y Ahlgren, A. (1990): *Science for all Americans*, Nueva York, Oxford University Press.

Sanders, J. H. (1965): *Velocity of Light*, Londres, Pergamon Press.

Schneps, N. H. (1987): *A Private Universe*, corto cinematográfico, Cambridge, Harvard University.

Schrödinger, Erwin (1999): *Qué es la vida*, Barcelona, Tusquets.

Steinberg, M. S. *et al.* (2004), *The Castle Project* en <*www.pasco.com*>.

Steinberg, Melvin S. y Brown, David E. (1990): “Genius is not immune to persistent misconceptions: conceptual difficulties impending Isaac Newton and contemporary physics students”, *International Journal of Science Education*, vol. 12, nº 3, págs. 265-273.

Strauss, Sydney (1988): *Ontogeny, Phylogeny and Historical Development*, Nueva Jersey, Ablex Publishing.

Toulmin, Stephen E. (1953): *The Philosophy of Science; an Introduction*, Londres, Hutchinson’s University Library.

Traweek, Sharon (1988): *Beamtimes and Lifetimes*, Cambridge, Harvard University Press.

Watson, James (2002): *La doble hélice*, Barcelona, Alianza.

Weiner, Jonathan (2000): *Time, Love and Memory: A Great Biologist and his Quest for the Origins of Behavior*, Nueva York, Vintage Books.

Wilson, Edward O. (2002): “The power of story”, *American Educator*, vol. de primavera, págs. 8-11.

Wolpert, Lewis (1992): *The Unnatural Nature of Science*, Cambridge, Harvard University Press.

Ziman, John (1968): *Public Knowledge: an Essay Concerning the Social Dimension of Science*, Londres, Cambridge University Press.